

Band 6 _ PRODUKTION UND ENERGIE

Julian Stengel

AKTEURSBASIERTE SIMULATION DER
ENERGETISCHEN MODERNISIERUNG DES
WOHNGEBÄUDEBESTANDS IN DEUTSCHLAND



Scientific
Publishing

Julian Stengel

**Akteursbasierte Simulation der energetischen Modernisierung
des Wohngebäudebestands in Deutschland**

PRODUKTION UND ENERGIE

Karlsruher Institut für Technologie (KIT)
Institut für Industriebetriebslehre und Industrielle Produktion
Deutsch-Französisches Institut für Umweltforschung

Band 6

Eine Übersicht aller bisher in dieser Schriftenreihe
erschienenen Bände finden Sie am Ende des Buches.

Akteursbasierte Simulation der energetischen Modernisierung des Wohngebäudebestands in Deutschland

von
Julian Stengel

Dissertation, Karlsruher Institut für Technologie (KIT)
Fakultät für Wirtschaftswissenschaften
Tag der mündlichen Prüfung: 23. Juni 2014
Referenten: Prof. Dr. Frank Schultmann, Prof. Dr. Thomas Lützkendorf

Impressum



Karlsruher Institut für Technologie (KIT)
KIT Scientific Publishing
Straße am Forum 2
D-76131 Karlsruhe

KIT Scientific Publishing is a registered trademark of Karlsruhe
Institute of Technology. Reprint using the book cover is not allowed.

www.ksp.kit.edu



*This document – excluding the cover – is licensed under the
Creative Commons Attribution-Share Alike 3.0 DE License
(CC BY-SA 3.0 DE): <http://creativecommons.org/licenses/by-sa/3.0/de/>*



*The cover page is licensed under the Creative Commons
Attribution-No Derivatives 3.0 DE License (CC BY-ND 3.0 DE):
<http://creativecommons.org/licenses/by-nd/3.0/de/>*

Print on Demand 2014

ISSN 2194-2404

ISBN 978-3-7315-0236-4

DOI 10.5445/KSP/1000041854

Akteursbasierte Simulation der energetischen Modernisierung des Wohngebäudebestands in Deutschland

Zur Erlangung des akademischen Grades eines
Doktors der Wirtschaftswissenschaften
(Dr. rer. pol.)

der Fakultät für Wirtschaftswissenschaften
des Karlsruher Instituts für Technologie (KIT)

genehmigte
DISSERTATION

von
Dipl.-Wi.-Ing. Julian Dominik Stengel

Tag der mündlichen Prüfung: 23. Juni 2014

Referent: Prof. Dr. rer. pol. Frank Schultmann

Korreferent: Prof. Dr.-Ing. habil. Thomas Lützkendorf

Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand zwischen 2009 und 2014 während meiner Tätigkeit am Institut für Industriebetriebslehre und Industrielle Produktion (IIP) und am Deutsch-Französischen Institut für Umweltforschung (DFIU) des Karlsruher Instituts für Technologie (KIT), zu Beginn meiner Tätigkeit Universität Karlsruhe (TH). Den Anstoß zu dieser Arbeit lieferte das vom Bundesministerium für Bildung und Forschung geförderte Projekt "otello".

Ich danke meinem Doktorvater Herrn Prof. Dr. rer. pol. Frank Schultmann für die Betreuung meiner Arbeit und Herrn Prof. Dr.-Ing. habil. Thomas Lützkendorf für die Übernahme des Korreferats. Des Weiteren möchte ich meiner Familie, meiner Lebensgefährtin und meinen Kollegen für die Ermöglichung dieser Arbeit und die Unterstützung bei der Erstellung derselben danken.

Besonderer Dank unter (ehemaligen) Kollegen richtet sich an Jens, Michael, Robert, Karoline, Simon, Rebecca, Rebekka, Anna, Frank und Erik.

Julian Stengel

Karlsruhe, im August 2014

Kurzfassung

In der Dissertation wird das aktorsbasierte Wohngebäude- und Haushaltsmodell *AWOHM* zur Identifizierung und Konzipierung adäquater Bündel umweltpolitischer Instrumente im Themenfeld Wärmenutzung mit Fokus auf der energetischen Modernisierung entwickelt und auf die Bundesrepublik Deutschland angewandt.

Um politische Entscheidungsträger bei der Identifizierung adäquater umweltpolitischer Instrumentenbündel zu unterstützen, werden auf nationaler Ebene *Bottom-Up*-Wohngebäudebestandsmodelle eingesetzt. Mit diesen werden Entwicklungspfade des Gebäudebestands simuliert und vorwiegend hinsichtlich Treibhausgasemissionen, Energiebedarf, Investitionen und Energiekosten bewertet. Dabei werden häufig Sanierungspakete sowie zugehörige Umsetzungsraten exogen vorgegeben. Neuere Modelle zielen auf die Simulation der Sanierungsentscheidung und die Berücksichtigung von Sanierungshemmnissen ab, wobei Charakteristika und Dynamik der beteiligten Akteure bislang weitgehend unberücksichtigt bleiben.

In dieser Arbeit wird durch die integrierte Modellierung der Akteure *Eigentümer* und *Bewohner* sowie der Wohngebäude einerseits die Abbildung von Sanierungshemmnissen verbessert. Andererseits werden die finanzielle Überforderung von selbstnutzenden Eigentümern, Mietern und Vermietern sowie Mitnahmeeffekte quantifizierbar gemacht. Die Beurteilung der Adäquatheit von Instrumentenbündeln orientiert sich an der deutschen Nachhaltigkeitsstrategie. Dabei werden insbesondere auch Luftschadstoffemissionen sowie deren räumliche Verteilung, Umverteilungswirkungen und finanzielle Überlastungen einkommensschwacher Haushalte in die Betrachtung einbezogen. Durch die Modellierung der Gebäude und Haushalte auf Mikroebene wird eine

hemmnis- und potenzialgetriebene Neu-/Umgestaltung umweltpolitischer Instrumente sowie deren Anpassung an unterschiedliche Zielgruppen mittels auf der Clusteranalyse basierender Verfahren ermöglicht. Da die Modellierung auf Mikroebene zusätzliche Unsicherheiten bedingt, werden diese mit *Monte-Carlo*-Simulationen und Szenarien analysiert.

Mittels *AWOHM* werden Entwicklungspfade des Wohngebäude- und Haushaltsbestands in Deutschland bis 2030 simuliert und bewertet. Es werden technische, ökonomische und ausschöpfbare Emissionsreduktionspotenziale bestimmt sowie umweltpolitische Instrumentenbündel zusammengestellt, die an die Charakteristika der Gebäude, Eigentümer und Bewohner angepasst sind. Abschließend werden Möglichkeiten zur weiteren Anwendung und Erweiterung von *AWOHM* aufgezeigt.

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis	I
Abbildungsverzeichnis	VI
Tabellenverzeichnis.....	XI
Abkürzungsverzeichnis.....	XXI
1. Einleitung	1
1.1 Ausgangslage und Problemstellung.....	1
1.2 Zielsetzung, Forschungsfragen und Lösungsweg.....	4
2. Wärmenutzung im Wohngebäudebestand in Deutschland	11
2.1 Energieverbrauch sowie Luftschadstoff- und Treibhausgasemissionen	11
2.2 Gebäude- und Wärmeerzeugertypologien zur Analyse von Energieverbrauch und Emissionen	13
2.2.1 Gebäude- und Wärmeerzeugertypologie im Mikrozensus	14
2.2.2 Wohngebäudetypologie vom Institut Wohnen und Umwelt	17
2.2.3 Wärmeerzeugertypologie von Struschka u. a.	20
2.2.4 Bisherige Modernisierungsaktivitäten.....	23
2.3 Rechtliche Rahmenbedingungen.....	25
2.3.1 Umweltpolitische Instrumente.....	25
2.3.2 Umweltpolitische Ziele und internationaler Rahmen.....	31
3. Wohngebäudebestands- und Sanierungsentscheidungsmodelle	35
3.1 Wohngebäudebestandsmodelle	36
3.1.1 Überblick über Wohngebäudebestandsmodelle.....	36
3.1.2 <i>Bottom-Up</i> -Wohngebäudebestandsmodelle	38
3.1.3 Simulierende Modelle.....	42
3.1.4 <i>Bottom-Up</i> -Modelle für Deutschland.....	44
3.1.5 <i>Bottom-Up</i> -Modelle für andere Länder	47
3.1.6 Forschungslücken bei <i>Bottom-Up</i> -Modellen.....	50
3.2 Modellierung der Sanierungsentscheidung.....	55
3.2.1 Überblick über Diffusionsmodelle	56
3.2.2 Daten und Analysen zu Sanierungsentscheidungen.....	57
3.2.3 Sanierungsentscheidungsmodelle	59

3.2.4 In Gebäudebestandsmodelle integrierte Sanierungsentscheidungsmodelle	64
3.3 Sonstige Grundlagen und Abgrenzungen	66
3.3.1 Datenlage zur Energienutzung in Wohngebäuden	66
3.3.2 Abgrenzung zur begrenzt rationalen Energienutzung.....	68
3.4 Schlussfolgerungen	68
4. Charakterisierung von Gebäudeeigentümern und Bewohnern in Hinsicht auf die energetische Sanierung	73
4.1 Wohngebäudeeigentümer	74
4.1.1 Selbstnutzende Eigentümer	75
4.1.2 Private Vermieter	91
4.1.3 Institutionelle Vermieter	96
4.2 Mieter.....	99
4.2.1 Bezug der Mieter zur energetischen Sanierung.....	99
4.2.2 Sozio-demographische Merkmale von Mietern	101
4.3 Akteursumfeld	105
4.4 Schlussfolgerungen.....	107
5. Entwicklung des aktorsbasierten Wohngebäude- und Haushaltsmodells <i>AWOHM</i>	111
5.1 Modellanforderungen	112
5.2 Überblick über <i>AWOHM</i>	113
5.3 Integrierte Abbildung von Wohngebäude- und Haushaltsbestand sowie Ermittlung des Startbestands.....	122
5.3.1 Modelldatenstruktur und Datenquellen	124
5.3.2 Bewohner	129
5.3.3 Wohnung	131
5.3.4 Einzelgebäude	133
5.3.5 Energetische Stammdaten	135
5.3.6 Hüllpaket.....	140
5.3.7 Oberer Gebäudeabschluss, Fenster, Außenwände und unterer Gebäudeabschluss	144
5.3.8 Wärmeversorgungspaket.....	146
5.3.9 Stammdaten Wärmeerzeuger, Wärmeerzeuger und Energieträger.....	148
5.3.10 Stammdaten Energieträgerverfügbarkeit und Energieträgerverfügbarkeit	158

5.3.11	Stammdaten Verrohrung und Speicher sowie Verrohrung und Speicher	159
5.3.12	Bundesland, Kreis und Gemeinde	161
5.3.13	Stichprobenziehung, Leerstand und Hochrechnungsfaktoren	163
5.4	Modellierung der Gebäudebestandsveränderung	168
5.4.1	Überblick.....	168
5.4.2	Erreichbare Sanierungsvarianten	172
5.4.3	Indikatoren für Sanierungsentscheidungsmodelle.....	181
5.4.4	Sanierungsentscheidungsmodelle	206
5.4.5	Abbruch.....	234
5.4.6	Neubau.....	235
5.5	Dynamik des Haushaltsbestands	239
5.5.1	Haushaltsveränderung im engeren Sinne.....	241
5.5.2	Wohnungsmarktwechsel	251
5.5.3	Wohnungssuche.....	255
5.6	Szenarien und Unsicherheiten	263
5.6.1	Szenarien	263
5.6.2	Unsicherheiten	269
5.6.3	Umweltpolitische Instrumente.....	272
6.	Bewertung und Analyse	281
6.1	Indikatorenbasierte Bewertung aus Staatssicht	281
6.1.1	Indikatorensystem zur Bewertung aus Staatssicht	282
6.1.2	Indikatortypisierung auf der Basisebene.....	284
6.1.3	Generationengerechtigkeit.....	297
6.1.4	Lebensqualität.....	304
6.1.5	Sozialer Zusammenhalt	309
6.2	Multivariate Analysen	312
6.2.1	Einordnung in den Gesamtkontext.....	313
6.2.2	Ausgestaltung von Mindestanforderungspaketen	315
6.2.3	Ausgestaltung von Förderpaketen.....	320
6.2.4	Zielgruppenadaptation umweltpolitischer Instrumente.....	334
6.2.5	Identifizierung von „sozialen Brennpunkten“.....	339
6.2.6	Identifizierung von Abhängigkeiten.....	342
7.	Anwendung von <i>AWOHM</i>	345
7.1	Plausibilisierung der Startbestandserstellung.....	347
7.1.1	Wohnflächen und Wohneinheitenanzahl.....	349
7.1.2	Wärmeerzeugeranzahl.....	350

7.1.3	Energetische Qualität der Bauteile.....	352
7.1.4	End- und Primärenergieverbrauch	354
7.1.5	Luftschadstoff- und Treibhausgasemissionen.....	356
7.1.6	Verfügbares Einkommen nach Wohnen.....	362
7.1.7	Warme Nebenkosten.....	364
7.1.8	Schlussfolgerungen	366
7.2	Technisches Potenzial	370
7.2.1	Szenarien	371
7.2.2	Emissionsminderungs- und Energieeinsparpotenziale.....	372
7.2.3	Plausibilisierung.....	375
7.2.4	Identifizierung von Abhängigkeiten	375
7.3	Ökonomisches Potenzial	379
7.3.1	Szenarien	379
7.3.2	Emissionsminderungs- und Energieeinsparpotenziale.....	383
7.3.3	Plausibilisierung.....	388
7.3.4	Ausgestaltung von Mindestanforderungspaketen.....	390
7.3.5	Ausgestaltung von Förderpaketen	404
7.4	Ausschöpfbares Potenzial	415
7.4.1	Szenarien	416
7.4.2	Emissionsminderungs- und Energieeinsparpotenziale.....	420
7.4.3	Plausibilisierung.....	424
7.4.4	Zielgruppenadaption umweltpolitischer Instrumente	427
7.4.5	Identifizierung von „sozialen Brennpunkten“	436
7.5	Indikatorenbasierte Bewertung	442
7.5.1	Aggregierte Bewertung aus Staatssicht.....	443
7.5.2	Implikationen hinsichtlich der Hauptforschungsfrage	452
7.5.3	Exemplarische detaillierte Indikatoren.....	455
8.	Schlussfolgerungen und Ausblick	459
8.1	Das aktorsbasierte Wohngebäude- und Haushaltsmodell <i>AWOHH</i>	459
8.2	Kritische Würdigung des Modells	462
8.3	Beantwortung der Forschungsfragen	468
8.3.1	Technisches Potenzial.....	469
8.3.2	Ökonomisches Potenzial.....	470
8.3.3	Ausschöpfbares Potenzial	473
8.3.4	Zielkonflikte der Nachhaltigkeitsbewertung	477
8.3.5	Cluster mit techno-ökonomischen Potenzialen	479

8.3.6 Lastenverteilung und „soziale Brennpunkte“	482
8.3.7 Lastenverschiebung	485
8.3.8 Geeignete Bündel umweltpolitischer Instrumente.....	486
8.4 Ausblick auf zukünftige Forschungsarbeiten.....	489
9. Zusammenfassung	493
A Anhang	501
A.1 Ausgewählte Daten zu <i>AWOHM</i>	501
A.2 Plausibilisierung der Startbestandserstellung	509
A.3 Ergänzung zur Identifizierung „sozialer Brennpunkte“	510
B Literaturverzeichnis.....	511

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Struktur der vorliegenden Arbeit.....	9
Abbildung 2: Durch die Wärmenutzung in Haushalten bedingter Anteil an ausgewählten Emissionen und dem nicht erneuerbaren Primärenergieverbrauch für Deutschland im Jahr 2006.....	12
Abbildung 3: Entwicklung der Emissionen aus Feuerungsanlagen der Haushalte und des Endenergieverbrauchs von 1990 bis 2011	13
Abbildung 4: Anzahl der Wohneinheiten bezogen auf die Länge der Baualtersklassen im Jahr 2006 für Deutschland	16
Abbildung 5: Mittlerer wohnflächenspezifischer Nutzenergieverbrauch für die Raumheizung im Jahr 2006 für Deutschland differenziert nach Gebäudetyp (ohne Sonderbauten in den neuen Bundesländern) und Baualtersklasse	20
Abbildung 6: Wärmeerzeugerbestand privater Haushalte für Deutschland im Jahr 2006 und über alle Feuerungstechniken je Energieträger gemittelte direkte CO ₂ -, NO _x -, SO ₂ -, VOC-, CH ₄ - und PM-Emissionsfaktoren ...	22
Abbildung 7: Anteile ungedämmter, nachträglich gedämmter und im Urzustand gedämmter Bauteilflächen im Wohngebäudebestand in Deutschland im Jahr 2009/2010.....	24
Abbildung 8: Anteile undgedämmter, nachträglich gedämmter und im Urzustand gedämmter Bauteilflächen im Wohngebäudebestand in Deutschland im Jahr 2009/2010 differenziert nach Ein-/Zweifamilienhäusern (EFH/ZFH) und Mehrfamilienhäusern (MFH)	77
Abbildung 9: Einbettung von <i>AWOHM</i> in den Analyseprozess zur Beantwortung der Hauptforschungsfrage.....	114
Abbildung 10: Übersicht über <i>AWOHM</i>	117
Abbildung 11: Zusammenhang zwischen Mikrozensusdatensatz, Modelldatenstruktur und weiteren Hauptdatenquellen.....	125
Abbildung 12: Modelldatenstruktur zur integrierten Abbildung von Gebäudehülle, Anlagentechnik und Bewohner	127
Abbildung 13: Zulässige Energieträgerwechsel für die Raumheizung	180
Abbildung 14: Haushalts- und Wohnungsveränderung, Wohnungsmarktwechsel und Wohnungssuche auf einem regionalen Wohnungsmarkt.....	241
Abbildung 15: Modellierungsschritte der Haushaltsveränderung im engeren Sinne.....	242

Abbildung 16: Altershäufigkeitsverteilung von Personen, die in einem Haushalt ohne Kinder wohnen (SUF EF669=0) und in den letzten 12 Monaten den Wohnsitz gewechselt haben (SUF EF451=8) mit einem Alter unter 40 Jahren (SUF EF44<40).....	247
Abbildung 17: Übersicht über die Modellierung von Zusammenlegen und Teilen der Haushalte in <i>AWOHM</i>	249
Abbildung 18: Über 5 Jahre geglättete Wahrscheinlichkeit für die Zusammenlegung von Einpersonenhaushalten (mit einem anderen) innerhalb des nächsten Jahres.....	251
Abbildung 19: Übersicht über die Elemente eines Szenarios in <i>AWOHM</i>	264
Abbildung 20: Räumliche und zeitliche Auflösungen in <i>AWOHM</i>	286
Abbildung 21: Aggregationsschema des räumlich-zeitlichen Indikatortyps A	289
Abbildung 22: Aggregationsschema des räumlich-zeitlichen Indikatortyps B	292
Abbildung 23: Aggregationsschema des räumlich-zeitlichen Indikatortyps C	295
Abbildung 24: Einordnung der multivariaten Analysen in den Gesamtkontext von <i>AWOHM</i>	313
Abbildung 25: Unter- und Obergrenzen der Häufigkeiten von Wohneinheiten in Abhängigkeit vom Energieverbrauch für Raumwärme und Warmwasser im Jahr 2006 differenziert nach Endenergie sowie nicht erneuerbarer und gesamter Primärenergie bei der Simulation von 20 Basisszenarien.....	356
Abbildung 26: Unter- und Obergrenzen der Häufigkeiten von Wohneinheiten in Abhängigkeit von den direkten Emissionen für Raumwärme und Warmwasser im Jahr 2006 differenziert nach CO ₂ inkl./exkl. Emissionen aus Biomasse (oben), CH ₄ , NO _x , SO ₂ , NMVOC und PM (unten) bei der Simulation von 20 Basisszenarien.....	360
Abbildung 27: Anteil von Luftschadstoff- und Treibhausgasemissionen des Emissionskatasters für Bayern (nicht genehmigungspflichtige Anlagen, 2000), der von den <i>AWOHM</i> -Emissionen (nur Wohngebäude) im Jahr 2006 auf Kreisebene abgedeckt wird	361
Abbildung 28: Betrag maximaler Kenngrößenabweichung von dem zugehörigen Mittelwert bei der Simulation von 20 Basisszenarien für mehrere Kenngrößen auf Wohnungsebene im Jahr 2006 in Abhängigkeit vom Anteil der betrachteten Wohneinheiten	362
Abbildung 29: Unter- und Obergrenzen der Häufigkeiten von Haushalten in Abhängigkeit vom Haushaltsnettoeinkommen im Jahr 2006 differen-	

ziert nach Selbstnutzer und Mieter ohne Abzug, abzüglich Energiekosten für Raumwärme und Warmwasser sowie abzüglich der Warmmiete (nur bei Mietern) bei der Simulation von 20 Basisszenarien	364
Abbildung 30: Vergleich der Energiekosten für Raumwärme und Warmwasser in vermieteten Wohnungen anhand der Unter- und Obergrenze der Anzahl an Wohnungen gemäß <i>AWOHH</i> im Jahr 2006 bei der Simulation von 20 Basisszenarien und den im SUF des Mikrozensus 2006 angegebenen warmen Nebenkosten.....	365
Abbildung 31: Unter- und Obergrenzen der Anzahl an Wohnungen in Abhängigkeit vom Verhältnis von in <i>AWOHH</i> für das Jahr 2006 berechneten Energiekosten für Raumwärme und Warmwasser zu den im SUF des Mikrozensus 2006 angegebenen warmen Nebenkosten bei der Simulation von 20 Basisszenarien.....	366
Abbildung 32: Streudiagramm zu Emissionen an CO ₂ (exkl. Biomasse) und PM im Jahr 2006 sowie im Jahr 2030 gemäß den Szenarien <i>TP NO_x</i> und <i>TP Primärenergie nicht erneuerbar</i> (gestutzte Abbildung)	378
Abbildung 33: Normiertes Heterogenitätsmaß (Summe der Fehlerquadratsummen innerhalb von Clustern) in Abhängigkeit von der Clusteranzahl bei der Ausgestaltung von Mindestanforderungspaketen.....	391
Abbildung 34: Häufigkeiten (ohne Hochrechnung) der zu Cluster A gehörenden Gebäude in Abhängigkeit vom Baujahr bei der Clusteranalyse zur Identifizierung von Mindestanforderungen bei einer Clusteranzahl von zehn.....	394
Abbildung 35: Häufigkeiten (ohne Hochrechnung) der zu Cluster A gehörenden Gebäude in Abhängigkeit vom Wärmedurchgangskoeffizienten des unteren Gebäudeabschlusses vor und nach einer etwaigen Sanierung bei einer Clusteranzahl von zehn	395
Abbildung 36: Häufigkeiten (ohne Hochrechnung) der zu Cluster A gehörenden Gebäude in Abhängigkeit vom Wärmedurchgangskoeffizienten des oberen Gebäudeabschlusses vor und nach einer etwaigen Sanierung bei einer Clusteranzahl von zehn	396
Abbildung 37: Häufigkeiten (ohne Hochrechnung) der zu Cluster A gehörenden Gebäude in Abhängigkeit vom Wärmedurchgangskoeffizienten der Wände vor und nach einer etwaigen Sanierung bei einer Clusteranzahl von zehn	397
Abbildung 38: Häufigkeiten (ohne Hochrechnung) der zu Cluster A gehörenden Gebäude in Abhängigkeit vom Wärmedurchgangskoeffizienten der Fenster vor und nach einer etwaigen Sanierung bei einer Clusteranzahl von zehn	399

Abbildung 39: Häufigkeiten (ohne Hochrechnung) der zu Cluster A gehörenden Gebäude in Abhängigkeit vom Anteil von Gas und sonstigen fossilen Energieträgern am Endenergiebedarf vor und nach einer etwaigen Sanierung bei einer Clusteranzahl von zehn	400
Abbildung 40: Häufigkeiten (ohne Hochrechnung) der zu Cluster B gehörenden Gebäude in Abhängigkeit vom Anteil von Gas, Fernwärme und sonstigen fossilen Energieträgern am Endenergiebedarf vor und nach einer etwaigen Sanierung bei einer Clusteranzahl von zehn.....	401
Abbildung 41: Häufigkeiten (ohne Hochrechnung) der zu Cluster A gehörenden Gebäude in Abhängigkeit von der mittleren Effizienz der Wärmeerzeuger vor und nach einer etwaigen Sanierung bei einer Clusteranzahl von zehn.....	402
Abbildung 42: Häufigkeiten (ohne Hochrechnung) der zu Cluster B gehörenden Gebäude in Abhängigkeit von der mittleren Effizienz der Wärmeversorger vor und nach einer etwaigen Sanierung bei einer Clusteranzahl von zehn.....	403
Abbildung 43: Mittlere Förderausgaben pro CO ₂ -Vermeidung (direkte Emissionen inkl. Biomasse) in Abhängigkeit von der kumulierten CO ₂ -Vermeidung bei unterschiedlichen Differenzierungen der Förderpakete	408
Abbildung 44: Ausnutzungsgrad der anvisierten CO ₂ -Vermeidung (direkte Emissionen inkl. Biomasse) bei mittleren Förderausgaben von 70 €/t in Abhängigkeit von der Förderpaketanzahl.....	410
Abbildung 45: Normiertes Heterogenitätsmaß (Summe der Fehlerquadratsummen innerhalb von Clustern) in Abhängigkeit von der Clusteranzahl bei der Zielgruppenadaption umweltpolitischer Instrumente für Selbstnutzer.....	428
Abbildung 46: Normiertes Heterogenitätsmaß (Summe der Fehlerquadratsummen innerhalb von Clustern) in Abhängigkeit von der Clusteranzahl bei der Zielgruppenadaption umweltpolitischer Instrumente für (Ver-)Mieter.....	428
Abbildung 47: Bewertung ausgewählter Szenarien aus Staatssicht differenziert nach Ebene-1-Indikatoren.....	445
Abbildung 48: Teilnutzen ausgewählter Szenarien aus Staatssicht in der Dimension <i>Generationengerechtigkeit</i> differenziert nach Ebene-3-Indikatoren.....	447
Abbildung 49: Teilnutzen ausgewählter Szenarien aus Staatssicht in der Dimension <i>Lebensqualität</i> differenziert nach Ebene-3-Indikatoren.....	449

Abbildung 50: Teilnutzen ausgewählter Szenarien aus Staatssicht in der Dimension *sozialer Zusammenhalt* differenziert nach Ebene-3-Indikatoren451

Abbildung 51: Direkte gebietsflächenbezogene NO_x-, PM- und SO₂-Emissionen [kg/(km² a)] aus Wohngebäuden auf Kreisebene für die Jahre 2006 und 2030 in den Szenarien *Prognose Stengel 11 \$\$\$* und *Staatssicht 11*.....457

Abbildung 52: Zeitliche Entwicklung der direkten PM-Emissionen aus Wohngebäuden in Deutschland für die Szenarien *Ökomodernisierer 11 W**, *Ökomodernisierer 11* und *Prognose Stengel 11 \$\$\$ von 2006 bis 2030*.....458

Abbildung 53: Normiertes Heterogenitätsmaß (Summe der Fehlerquadratsummen innerhalb von Clustern) in Abhängigkeit von der Clusteranzahl bei der Identifizierung „sozialer Brennpunkte“ für Selbstnutzer im Szenario *Staatssicht 11 MA*.....510

Abbildung 54: Normiertes Heterogenitätsmaß (Summe der Fehlerquadratsummen innerhalb von Clustern) in Abhängigkeit von der Clusteranzahl bei der Identifizierung „sozialer Brennpunkte“ für Mieter im Szenario *Staatssicht 11 MA*.....510

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Zentrale umweltpolitische Instrumente für den Bereich Wärmenutzung in Wohngebäuden in Deutschland im Jahr 2013 auf nationaler Ebene	26
Tabelle 2: Simulierende und <i>Accounting-Bottom-Up</i> -Wohngebäude- bzw. Anlagentechnikbestandsmodelle im Wärmebereich	51
Tabelle 3: <i>Logit</i> -Modelle zur Simulation der Investitionsentscheidung von Selbstnutzern	61
Tabelle 4: Häufigkeiten der von Standard-Sanierern und energetischen Sanierern gemäß einer Selbstnutzer-Befragung umgesetzten Maßnahmen	78
Tabelle 5: Altersverteilung von Selbstnutzern sowie selbstnutzenden Sanierern, Nicht-Sanierern und energetischen Sanierern im Vergleich	81
Tabelle 6: Haushaltsnettoeinkommensverteilung von Selbstnutzern sowie selbstnutzenden Sanierern, Nicht-Sanierern und energetischen Sanierern im Vergleich	84
Tabelle 7: Haushaltsgrößenverteilung von Selbstnutzern sowie selbstnutzenden Sanierern, Nicht-Sanierern und energetischen Sanierern im Vergleich	85
Tabelle 8: Bildungsgradverteilung von Selbstnutzern sowie selbstnutzenden Sanierern, Nicht-Sanierern und energetischen Sanierern im Vergleich	86
Tabelle 9: Spearman-Rangkorrelationskoeffizienten der klassierten, ordinalen Variablen Alter, Bildungsgrad, Haushaltsgröße und Haushaltsnettoeinkommen bei Selbstnutzern basierend auf dem SUF (<i>Scientific-Use-File</i>) des Mikrozensus 2006	88
Tabelle 10: Haushaltsnettoeinkommensverteilung von Hauptmietern differenziert nach Baualtersklassen	101
Tabelle 11: Mietbelastungsquotenverteilung (Warmmiete pro Haushaltsnettoeinkommen) von Hauptmietern differenziert nach Haushaltsnettoeinkommensklassen	101
Tabelle 12: Altersverteilung von Hauptmietern differenziert nach Baualtersklassen	103
Tabelle 13: Haushaltsgrößenverteilung von Hauptmietern differenziert nach Baualtersklassen	104

Tabelle 14: Datenlage in Mikrozensus und Zensus differenziert nach Eigentümerstrukturen	126
Tabelle 15: Übersicht über Datenherkunft und -verwendung bei der Ermittlung des Startbestands im Jahr 2006	129
Tabelle 16: Attribute, Kürzel, Wertebereiche und Quellen je <i>Bewohner b</i>	130
Tabelle 17: Attribute, Kürzel, Wertebereiche und Quellen je <i>Wohnung w</i>	132
Tabelle 18: Attribute, Kürzel, Wertebereiche und Quellen je <i>Einzelgebäude g</i>	134
Tabelle 19: Attribute, Kürzel, Wertebereiche und Quellen der <i>energetischen Stammdaten gs</i>	136
Tabelle 20: Wahrscheinlichkeiten für die Zuordnung einer Kombination aus Baujahr (gezogen aus Wahrscheinlichkeitsverteilung) und Anzahl Wohneinheiten (SUF 2006 – EF635 und EF490) zu den IWU-Gebäu- detypen für die alten Bundesländer (ohne Berlin)	139
Tabelle 21: Wahrscheinlichkeiten für die Zuordnung einer Kombination aus Baujahr (gezogen aus Wahrscheinlichkeitsverteilung) und Anzahl Wohneinheiten (SUF 2006 – EF635 und EF490) zu den IWU-Gebäu- detypen für die neuen Bundesländer (mit Berlin)	139
Tabelle 22: Attribute, Kürzel, Wertebereiche und Quellen je <i>Hüllenpaket h</i> ... 141	141
Tabelle 23: Sanierungswahrscheinlichkeiten bzw. Anteil energetisch mo- dernisierter Gebäude an den Gebäuden mit Baujahr bis 1990 bzw. 1966 differenziert nach Fenstern, oberem Gebäudeabschluss, Außenwänden und unterem Gebäudeabschluss	143
Tabelle 24: Vereinfachte Darstellung relevanter Kennzahlen der in <i>AWOHM</i> definierten Sanierungsperioden	145
Tabelle 25: Attribute, Kürzel, Wertebereiche und Quellen je <i>oberem Gebäu- deabschluss, Fenster, Außenwand</i> und <i>unterem Gebäudeabschluss</i>	146
Tabelle 26: Attribute, Kürzel, Wertebereiche und Quellen je <i>Wärmeversor- gungspaket v</i>	147
Tabelle 27: Attribute, Kürzel, Wertebereiche und Quellen der <i>Stammdaten Wärmeerzeuger vws</i>	150
Tabelle 28: Attribute, Kürzel, Wertebereiche und Quellen der <i>Energieträger et</i>	151
Tabelle 29: In <i>AWOHM</i> verwendete Instanzen der Klasse <i>Energieträger</i>	152
Tabelle 30: Attribute, Kürzel, Wertebereiche und Quellen je <i>Wärme- erzeuger vw</i>	152

Tabelle 31: Attribute, Wertebereiche und Quellen der Klasse zur Zuordnung potenzieller Wärmeerzeuger und Einsatzbereiche zu den Anlagentechnikmerkmalen des SUF des Mikrozensus 2006	154
Tabelle 32: Übersicht über Art und Anzahl von <i>Verrohrung</i> und <i>Wärmeerzeugern</i> in Abhängigkeit von den potenziellen Wärmeerzeugern, der Zentralität und dem Energieträger für die Warmwasserbereitung.....	156
Tabelle 33: Attribute, Kürzel, Wertebereiche und Quellen der <i>Stammdaten Energieträgerverfügbarkeit ves</i>	159
Tabelle 34: Attribute, Kürzel, Wertebereiche und Quellen je <i>Energieträgerverfügbarkeit ve</i>	159
Tabelle 35: Attribute, Kürzel, Wertebereiche und Quellen der <i>Stammdaten Verrohrung und Speicher vvs</i>	160
Tabelle 36: Attribute, Kürzel, Wertebereiche und Quellen zu <i>Verrohrung und Speicher vv</i>	161
Tabelle 37: Attribute, Kürzel, Wertebereiche und Quellen zu <i>Bundesland, Kreis und Gemeinde</i>	163
Tabelle 38: Leerstandsquoten differenziert nach Bundesländern im Jahr 2006.....	167
Tabelle 39: Bauteilflächenspezifische energiebedingte Mehrinvestitionen (einschließlich Montage) für die energetische Sanierung der Gebäudehülle in den Varianten 2007-2008 (+), 2007-2030a (++), 2007-2030b (+++), 2007-2030c (++++) im Jahr 2009	174
Tabelle 40: Attribute, Wertebereiche und Quellen der Klasse <i>potenzielle Wärmeversorgungspakete</i> als Obermenge der bei der Sanierung zur Verfügung stehenden Wärmeversorgungspakete.....	176
Tabelle 41: Durch Energieträgerwechsel verursachte Investitionen bzw. Ausgaben beim Wechsel der Anlagentechnik je Wohnfläche und je Gebäude im Jahr 2006	181
Tabelle 42: Hierarchisch angeordneter Satz von Indikatoren für die Bewertung einer energetischen Sanierung und die zugehörigen Sichtweisen bei <i>annahmenbasierten</i> Sanierungsentscheidungsmodellen.....	184
Tabelle 43: Indikatoren, die als Eingangsvariablen für die Anwendung der Sanierungsentscheidungsmodelle von Grösche u. a. (2009) sowie Acht nicht (2011) bei Selbstnutzern benötigt werden	189
Tabelle 44: Indizes und Indexmengen für die Indikatorspezifikation auf Attributsebene.....	190
Tabelle 45: Indexteilmengen für die Indikatorspezifikation auf Attributsebene	190

Tabelle 46: Spezielle Indizes für die Indikatorspezifikation auf Attributsebene.....	191
Tabelle 47: Parameter mit Index für die Indikatorspezifikation auf Attributsebene.....	191
Tabelle 48: Zwischenergebnisse mit Index für die Indikatorspezifikation auf Attributsebene.....	192
Tabelle 49: Kürzel, Attribute und Quellen der Klasse <i>sonstige Parameter</i>	193
Tabelle 50: Indizes, Indexmengen, Gewichtungen und Funktionen zur formalen Darstellung der Aggregation der Indikatoren.....	208
Tabelle 51: Zuordnung der <i>Einzelgebäude</i> zu den Eigentümerstrukturen	212
Tabelle 52: Anwendbare Entscheidungsansatzarten je Eigentümerstruktur	213
Tabelle 53: Potenzialarten und Potenzialakteurstypen.....	215
Tabelle 54: Gewichtungen der Entscheidungstypen selbstnutzender Eigentümer	216
Tabelle 55: Entscheidungsansätze mittels Entscheidungstypen bei Selbstnutzern	217
Tabelle 56: Zuordnung der Entscheidungstypen zu Zielgruppen und Häufigkeit differenziert nach Baualtersklassen im Entscheidungsansatz <i>Zufallsziehung Stieß</i>	217
Tabelle 57: Altersklassen, Haushaltsgrößen, Einkommen und bisherige Wohndauern, die in den Zielgruppen überrepräsentiert sind.....	218
Tabelle 58: Wahrscheinlichkeiten für die Zuordnung von Selbstnutzern zu Entscheidungstypen im <i>Entscheidungsansatz Selbstnutzer Stengel</i>	219
Tabelle 59: Gewichtungen der Entscheiderstrategien von Vermietern.....	221
Tabelle 60: Entscheidungsansätze mittels Entscheiderstrategien bei Vermietern	222
Tabelle 61: Wahrscheinlichkeiten der Zuordnung von Vermietern zu Entscheiderstrategien im Entscheidungsansatz <i>Zufallsziehung Schätzl</i>	222
Tabelle 62: Wahrscheinlichkeiten für die Zuordnung von Vermietern zu Entscheidungstypen im <i>Entscheidungsansatz Vermieter Stengel</i>	224
Tabelle 63: Empirisch fundierte Entscheidungsansätze mittels Modell A und B bei rein selbstnutzenden Eigentümern	225
Tabelle 64: Gewichtungen für Modell A für die Maßnahmen oberer Gebäudeabschluss (1000), Fenster (0100), Wand (0010), und Wärmeverorgungspaket (0001), Maßnahmenpakete sowie keine Sanierung.....	226
Tabelle 65: Gewichtungen $w_{a,g}$ für Modell B	226

Tabelle 66: Lage- und Streuungsparameter der Attributwerte eines exemplarischen Einfamilienhauses	227
Tabelle 67: Exogen vorgegebene Normierungsgrenzen für die Attribute der Sanierungsentscheidungsmodelle	231
Tabelle 68: Wohnflächenspezifische Neubauminvestitionen für die Kostengruppen 300 (Bauwerk – Baukonstruktionen) und 420 (Wärmeversorgungsanlagen) nach DIN 276 (1993) differenziert nach Gebäudetyp und Qualitätsstufe im Jahr 2008	239
Tabelle 69: Altersabhängige Sterbewahrscheinlichkeit im Jahr 2010	244
Tabelle 70: Wahrscheinlichkeit für Haushalte, im nächsten Jahr ein Kind zu bekommen, differenziert nach Altersklasse des Haupteinkommensbeziehers und Haushaltsgröße	246
Tabelle 71: Verteilung der Haushaltsnettoeinkommen, des Geschlechts und des höchsten schulischen/beruflichen Abschlusses 20-jähriger Einpersonenhaushalte im Jahr 2006	248
Tabelle 72: Altersverteilung von Ehepaaren, geschiedenen Ehen und Scheidungsraten	249
Tabelle 73: Anteil der Bevölkerung eines Bundeslands, der 2010 im selben Bundesland (über Gemeindegrenzen hinweg), in ein anderes Bundesland oder ins Ausland umgezogen ist, sowie Zuwanderung aus dem Ausland je Bundesland	253
Tabelle 74: Verteilung der innerhalb des Jahres 2005 eingezogenen Personen auf Gemeindegrößenklassen differenziert nach Bundesländern	254
Tabelle 75: Variablen für die Schätzung der Wahrscheinlichkeit, Mieter zu sein, der Kaltmiete und der Wohnungsgröße	259
Tabelle 76: Mittels SPSS geschätzte Koeffizienten von $p_{Mieter}(b,w)$	260
Tabelle 77: Mittels SPSS geschätzte Koeffizienten von KM_{Mieter}	262
Tabelle 78: Potenzielle Entscheidungsansätze in <i>AWOHM</i> je Eigentümerstruktur	265
Tabelle 79: Übersicht über (de)aktivierbare Module in <i>AWOHM</i>	266
Tabelle 80: Sonstige unsichere Parameter in <i>AWOHM</i>	268
Tabelle 81: Übersicht über die Unsicherheitsanalyse in <i>AWOHM</i>	271
Tabelle 82: Mindestanforderungspakete in Bezug auf die Gebäudehülle (Sanierung)	274
Tabelle 83: Mindestanforderungspakete in Bezug auf die Wärmeversorgung (Sanierung)	274

Tabelle 84: Mindestanforderungspakete in Bezug auf Gebäudehülle und Wärmeversorgung (Sanierung).....	275
Tabelle 85: Investitionszuschuss [in % der Investition] bei finanziellen Förderprogrammen für den Austausch der Wärmeerzeuger und/oder die Sanierung von Gebäudehüllenelementen	276
Tabelle 86: Merkmale und Merkmalsausprägungen für die Charakterisierung der in <i>AWOHM</i> zur Bewertung aus Staatssicht verwendeten Indikatoren.....	283
Tabelle 87: Ebene 1, 2 und 3 des in <i>AWOHM</i> zur Bewertung aus Staatssicht verwendeten Indikatorensystems.....	284
Tabelle 88: Weitere Parameter, die für die formale Spezifikation der Indikatoren zur Bewertung aus Staatssicht benötigt werden	287
Tabelle 89: Staatssichtindikatoren der Dimension <i>Generationengerechtigkeit</i>	298
Tabelle 90: Staatssichtindikatoren der Dimension <i>Lebensqualität</i>	306
Tabelle 91: Staatssichtindikatoren der Dimension <i>sozialer Zusammenhalt</i>	311
Tabelle 92: Variablen für die Ausgestaltung von Mindestanforderungspaketen in <i>AWOHM</i> mittels einer Clusteranalyse.....	318
Tabelle 93: Merkmale zur Spezifikation von Ausgangs- und Endzustand für die Förderpaketdefinition	325
Tabelle 94: Schema zur Bestimmung der mittleren Förderausgaben pro CO ₂ -Vermeidung in Abhängigkeit von der kumulierten CO ₂ -Vermeidung bei individueller, anteiliger und flächenbezogener Förderung.....	328
Tabelle 95: Relevanz ausgewählter Merkmale in Bezug auf das Auftreten von Hemmnissen und die Eignung umweltpolitischer Instrumente	337
Tabelle 96: Variablen für die Zielgruppenadaption umweltpolitischer Instrumente mittels einer Clusteranalyse	337
Tabelle 97: Variablen für die Identifizierung „sozialer Brennpunkte“ mittels einer Clusteranalyse	341
Tabelle 98: Variablen für die Identifizierung von Abhängigkeiten auf Gebäudeebene	343
Tabelle 99: Übersicht über die <i>AWOHM</i> -Szenarioelemente der Basis-szenarien, auf die bei der Definition aller sonstigen Szenarien Bezug genommen wird	346
Tabelle 100: Szenarien für die Unsicherheitsanalyse des Startbestands im Jahr 2006 differenziert nach zu analysierenden Parametern.....	349

Tabelle 101: Vergleich von Wohnfläche und Wohneinheitenanzahl in Wohngebäuden für das Jahr 2006 bzw. 2007	349
Tabelle 102: Abweichung der <i>AWOHM</i> -Wohneinheitenanzahl (inkl. Leerstand) in einem Basisszenario von Daten der amtlichen Gemeindestatistik differenziert nach Bundesländern im Jahr 2006.....	350
Tabelle 103: Vergleich der <i>AWOHM</i> -Wärmeerzeugeranzahl in einem Basisszenario [bzw. Szenario I, II, IV] mit von Struschka u. a. (2008) veröffentlichten Daten differenziert nach Energieträger bzw. aggregiertem Wärmeerzeugertyp.....	351
Tabelle 104: Anteil der Wohneinheiten im Jahr 2006 mit nachträglicher energetischer Verbesserung der Gebäudehülle gemäß <i>AWOHM</i> im Basisszenario [bzw. Szenario II, I] im Vergleich zu von Diefenbach u. a. (2010) veröffentlichten Daten (Anteil der Gebäude) zum Jahr 2009/2010 differenziert nach Gebäudetypen und Baualtersklassen.....	352
Tabelle 105: Anteil der Fensterbaualtersklassen im Jahr 2006 an allen Wohneinheiten gemäß <i>AWOHM</i> im Basisszenario [bzw. Szenario II, I] im Vergleich zu von Diefenbach u. a. (2010) veröffentlichten Daten (Anteil der Gebäude) zum Jahr 2009/2010.....	353
Tabelle 106: Anteil der Wohneinheiten im Jahr 2006 mit nachträglicher energetischer Verbesserung der Gebäudehülle gemäß <i>AWOHM</i> im Basisszenario differenziert nach Gebäudetyp und Bauteil.....	354
Tabelle 107: Vergleich von Endenergiebedarfsindikatoren auf nationaler Ebene für das Jahr 2006 für mehrere Szenarien gemäß <i>AWOHM</i> und mit exogenen Referenzwerten.....	355
Tabelle 108: Vergleich von Luftschadstoff- und Treibhausgasemissionsindikatoren auf nationaler Ebene für das Jahr 2006 für mehrere Szenarien gemäß <i>AWOHM</i> und mit exogenen Referenzwerten.....	357
Tabelle 109: Mittelwert, 90%-Quantil und Maximum von Luftschadstoffemissionen auf Gemeindeebene als Mittelwert über 20 Basisszenarien sowie als Maximum des Betrags der relativen Abweichung von diesem Mittelwert.....	358
Tabelle 110: Vergleich von Indikatoren der Einkommensverteilung nach Wohnen auf nationaler Ebene für das Jahr 2006 für mehrere Szenarien gemäß <i>AWOHM</i>	363
Tabelle 111: Definition der Szenarien zur Bestimmung der technischen Potenziale (technische Potenzialszenarien) durch Spezifikation der von den Basisszenarien abweichenden Szenarioelemente.....	372
Tabelle 112: Reduktionen der direkten verbrennungsbedingten CO ₂ -, CH ₄ -, NO _x -, SO ₂ -, NMVOC- und PM-Emissionen sowie des End- und Primär-	

energieverbrauchs des Wohngebäudebestands in Deutschland für Raumwärme und Warmwasser von 2006 bis 2030 in den technischen Potenzialszenarien.....	373
Tabelle 113: Paarweise Korrelationen zwischen Emissionsreduktionen auf Gebäudeebene im Szenario <i>TP NO_x</i>	376
Tabelle 114: Definition der Szenarien zur Bestimmung der ökonomischen Potenziale (ökonomische Potenzialszenarien) durch Spezifikation der von den Basisszenarien abweichenden Szenarioelemente.....	382
Tabelle 115: Reduktionen der direkten verbrennungsbedingten CO ₂ -, CH ₄ -, NO _x -, SO ₂ -, NMVOC- und PM-Emissionen sowie des End- und Primärenergieverbrauchs des Wohngebäudebestands in Deutschland für Raumwärme und Warmwasser von 2006 bis 2030 in den ökonomischen Potenzialszenarien.....	383
Tabelle 116: Ausnutzungsgrad der Reduktionen der direkten verbrennungsbedingten CO ₂ -, NO _x -, SO ₂ -, NMVOC- und PM-Emissionen sowie des End- und Primärenergieverbrauchs des Wohngebäudebestands in Deutschland für Raumwärme und Warmwasser von 2006 bis 2030 in den ökonomischen Potenzialszenarien in Bezug auf das Szenario <i>Technischer Kompromiss</i>	385
Tabelle 117: Barwerte der Ausgaben für die Wärmeversorgung der Gebäude und der Förderausgaben, mittlere CO ₂ -Emissionen sowie mittlere Förderausgaben pro vermiedenen CO ₂ -Emissionen für ausgewählte Szenarien jeweils für 2006 bis 2030.....	385
Tabelle 118: Variablenmittelwerte von Clustern mit 18% und 7% Anteil an allen Objekten bei der Clusteranalyse zur Ausgestaltung von Mindestanforderungen bei einer Clusteranzahl von zehn.....	391
Tabelle 119: Endzustände im Szenario <i>Staatssicht 11 MA</i> mit mindestens 1% Anteil am CO ₂ -Emissionsreduktionspotenzial eines Wechsels vom Szenario <i>KW11 MA</i>	406
Tabelle 120: Quantile der notwendigen Fördersätze auf Gebäudeebene bei flächenspezifischer und anteiliger Förderung bei den Endzuständen mit mindestens 1% Anteil am CO ₂ -Emissionsreduktionspotenzial im Szenario <i>Staatssicht 11 MA</i>	406
Tabelle 121: 13 Förderpakete bei mittleren Förderausgaben pro CO ₂ -Vermeidung (direkte Emissionen inkl. Biomasse) von 70 €/t bei Identifizierung mit der Methode <i>Zusammenlegung und Auswahl</i>	411
Tabelle 122: Verteilung der Wärmeversorgungspakettypen, energetischer Zustand der Gebäudehüllen und Förderhöhen der zu den Förderpaketen 4, 6, 10 und 11 gehörenden Ausgangszustände mit positiver Förderung.....	412

Tabelle 123: Definition der Szenarien zur Bestimmung der ausschöpfbaren Potenziale (ausschöpfbare Potenzialszenarien) durch Spezifikation der von den Basisszenarien abweichenden Szenarioelemente	419
Tabelle 124: Reduktionen der direkten verbrennungsbedingten CO ₂ -, CH ₄ -, NO _x -, SO ₂ -, NMVOC- und PM-Emissionen sowie des End- und Primärenergieverbrauchs des Wohngebäudebestands in Deutschland für Raumwärme und Warmwasser von 2006 bis 2030 in den ausschöpfbaren Potenzialszenarien	420
Tabelle 125: Variablenmittelwerte der Haushaltscluster selbstnutzender Eigentümer bei der Clusteranalyse zur Zielgruppenadaption umweltpolitischer Instrumente bei einer Clusteranzahl von sieben.....	429
Tabelle 126: Variablenmittelwerte der Haushaltscluster von Mietern bei der Clusteranalyse zur Zielgruppenadaption umweltpolitischer Instrumente bei einer Clusteranzahl von sieben.....	433
Tabelle 127: Variablenmittelwerte der Haushaltscluster von Selbstnutzern bei der Clusteranalyse zur Identifizierung „sozialer Brennpunkte“ bei einer Clusteranzahl von fünf im Szenario <i>Staatssicht 11 MA</i>	437
Tabelle 128: Variablenmittelwerte der Haushaltscluster von Selbstnutzern bei der Clusteranalyse zur Identifizierung „sozialer Brennpunkte“ bei einer Clusteranzahl von fünf im Szenario <i>Staatssicht 11 MA</i> bei auf 20 Jahre verkürzter erwarteter Lebensdauer der modernisierten Gebäudehülle.....	439
Tabelle 129: Variablenmittelwerte der Haushaltscluster von Mietern bei der Clusteranalyse zur Identifizierung „sozialer Brennpunkte“ im Szenario <i>Staatssicht 11 MA</i> bei einer Clusteranzahl von sechs und einer jährlichen Umlage von 11% der umlagefähigen Modernisierungsinvestitionen.....	440
Tabelle 130: Variablenmittelwerte der Haushaltscluster von Mietern bei der Clusteranalyse zur Identifizierung „sozialer Brennpunkte“ im Szenario <i>Staatssicht 11 MA reduzierte Umlage</i> bei einer Clusteranzahl von sechs und einer jährlichen Umlage von 5,5% der umlagefähigen Modernisierungsinvestitionen	442
Tabelle 131: Instanzen der Klasse <i>Stammdaten Wärmeerzeuger</i>	501
Tabelle 132: Instanzen der Klasse <i>energetische Stammdaten</i>	504
Tabelle 133: Instanzen der Klasse <i>Außenwand</i>	505
Tabelle 134: Instanzen der Klasse <i>Energieträgerverfügbarkeit</i>	508
Tabelle 135: Abweichung der Wohnflächen und Wohneinheitenanzahl (inkl. Leerstand) im Jahr 2006 gemäß <i>AWOHM</i> von den vom IWU im	

Jahr 2007 veröffentlichten Werten differenziert nach Gebäudetyp (ohne Sonderbauten) und Baualtersklasse	509
Tabelle 136: Abweichung der Wohnflächen und Wohneinheitenanzahl (inkl. Leerstand) im Jahr 2006 gemäß <i>AWOHM</i> von den vom IWU im Jahr 2007 veröffentlichten Werten differenziert nach Gebäudetyp (nur Sonderbauten) und Baualtersklasse.....	509

Abkürzungsverzeichnis

1. BImSchV	Erste Verordnung zur Durchführung des Bundes-Immissionsschutzgesetzes
AT	Österreich
AWOHM	Akteursbasiertes Wohngebäude- und Haushaltsmodell
BAFA	Bundesamt für Wirtschaft und Ausfuhrkontrolle
BKB	Braunkohlebriketts
BKI	Baukosteninformationszentrum Deutscher Architektenkammern GmbH
BMBF	Bundesministerium für Bildung und Forschung
BMVBW	Bundesministerium für Verkehr, Bau- und Wohnungswesen
BImSchG	Bundes-Immissionsschutzgesetz
CA	Kanada
CH	Schweiz
CH ₄	Methan
CO ₂	Kohlenstoffdioxid
DE	Deutschland
Difu	Deutsches Institut für Urbanistik
EF	Eingabefeld; bezieht sich auf das Schlüsselverzeichnis des Mikrozensus 2006
EFH	Einfamilienhaus
EEWärmeG	Erneuerbare-Energien-Wärmegesetz
EnergieStG	Energiesteuergesetz
EnergieStV	Energiesteuer-Durchführungsverordnung
EnEG	Energieeinsparungsgesetz

EnEV	Energieeinsparverordnung
EStG	Einkommensteuergesetz
ET	Energieträger
EWärmeG	Erneuerbare-Wärme-Gesetz
FR	Frankreich
g-Wert	Gesamtenergiedurchlassgrad
GdW	Bundesverband deutscher Wohnungs- und Immobilienunternehmen e.V.
GGK	Gemeindegrößenklasse
GMH	Großes Mehrfamilienhaus
GMH_NBL	Großes Mehrfamilienhaus in den neuen Bundesländern
HH	Hochhaus oder Haushalt(e)
HH_NBL	Hochhaus in den neuen Bundesländern
ID(s)	Identifizier
IINAS	International Institute for Sustainability Analysis and Strategy
IIP	Institut für Industriebetriebslehre und Industrielle Produktion
IWU	Institut Wohnen und Umwelt
KfW	Kreditanstalt für Wiederaufbau
KWK	Kraft-Wärme-Kopplung
LT	Litauen
MFH	Mehrfamilienhaus
MFH_NBL	Mehrfamilienhaus in den neuen Bundesländern
NECD	National Emissions Ceiling Directive
NMVO	Non-Methane Volatile Organic Compound
NO	Norwegen
NO _x	Stickstoffoxid

PM	Particulate Matter (Feinstaub)
PM ₁₀	Particulate Matter 10 (Feinstaub mit einem Durchmesser unter 10 µm)
PM _{2.5}	Particulate Matter 2.5 (Feinstaub mit einem Durchmesser unter 2,5 µm)
RH	Reihenhaus
RP	Revealed Preference Data
RW	Raumwärme
SGB	Sozialgesetzbuch
SolzG	Solidaritätszuschlaggesetz
SO ₂	Schwefeldioxid
SP	Stated Preference Data
SUF	Scientific-Use-File des Mikrozensus 2006
TP	Technisches Potenzial
UK	Großbritannien
U-Wert	Wärmedurchgangskoeffizient
UNECE	United Nations Economic Commission for Europe
VDI	Verein Deutscher Ingenieure
VOC	Volatile Organic Compound
WB	Wärmeerzeugerbestand
WE	Wohneinheit(en)
WoGG	Wohngeldgesetz
WSchV	Wärmeschutzverordnung
WW	Warmwasser

1. Einleitung¹

1.1 Ausgangslage und Problemstellung

Ausgangslage

Wohngebäude dienen der Sicherung der elementaren Daseinsgrundfunktion Wohnen. Im Gegenzug bedingen sie einen beträchtlichen Teil des Ressourcenverbrauchs, der Luftschadstoff- und Treibhausgasemissionen, der Flächeninanspruchnahme sowie der Ausgaben der privaten Haushalte. Im deutschen Nachhaltigkeitsdiskurs nehmen sie unter anderem deshalb in ökologischer, ökonomischer und sozialer Hinsicht eine Schlüsselrolle ein. In der als Teil der Nachhaltigkeitspolitik interpretierbaren Energiepolitik gilt laut dem Energiekonzept der Bundesregierung aus dem Jahr 2010 (vgl. Bundeskabinett 2010) insbesondere die Verdopplung der energetischen Sanierungsrate² des Gebäudebestands auf 2% p. a. als zentraler Beitrag zu den energiepolitischen Kernzielen Umweltschutz, Versorgungssicherheit und wirtschaftliche Vertretbarkeit. Daher soll eine Vielzahl von aufeinander abgestimmten umweltpolitischen Instrumenten die Dynamik des durch lange Sanierungszyklen geprägten Gebäudebestands erhöhen. Neben technischen Innovationen kommt dabei insbesondere dem breiten Einsatz bereits etablierter Techniken eine zentrale Bedeutung zu. In der Folge soll gemäß dem Energiekonzept der Bundesregierung der Wärmebedarf bis 2020 um 20% gesenkt sowie bis 2050 eine Primärenergiebedarfsreduktion um 80% und ein „nahezu klimaneutraler Gebäudebestand“ erreicht werden. Daneben existieren im Energiekonzept sowie über die Klimarahmenkonvention (vgl. UN 1992, 1998, 2012), das Genfer Luftrein-

¹ Teile der vorliegenden Arbeit wurden von Hiete, Stengel u. a. (2011) und Stengel u. a. (2012) vorab publiziert (insbesondere Teile der Kapitel 2 und 3 sowie Abschnitte 5.3, 5.4, 6.1, 7.2.3, 7.3.3 und 7.4.3) sowie 2012 und 2013 als Skizzen für Forschungsvorhaben (Gesamtansatz) eingereicht. Ohne Zitat übernommene Teilmhalte dieser Quellen wurden dabei ausschließlich von dem Autor der vorliegenden Arbeit erarbeitet.

² Die Begriffe *energetische Modernisierung* und *energetische Sanierung* werden in dieser Arbeit als Synonyme verwendet.

halteabkommen (vgl. UNECE 1979, 2012)³, die Strategie Europa 2020 (vgl. Europäischer Rat 2010) und die deutsche Nachhaltigkeitsstrategie (vgl. Bundesregierung 2002) weitere Zielvorgaben hinsichtlich Treibhausgas- und Luftschadstoffemissionen, Energieverbrauch⁴ und des Anteils erneuerbarer Energien, die sich über den Gebäudebestand hinaus auf alle Emittenten bzw. Verbraucher in Deutschland beziehen.

Problemstellung

Zur Verdopplung der Sanierungsrate von 1% auf 2% p. a., wie im Energiekonzept der Bundesregierung anvisiert (vgl. Bundeskabinett 2010), muss die derzeitige Ausgestaltung des umweltpolitischen Instrumentenbündels im Bereich Wärmenutzung⁵ in Wohngebäuden angepasst werden. Neben der als Hilfsziel interpretierbaren Sanierungsrate sollten in die Eignungsbeurteilung potenzieller Instrumentenbündel aus Staatssicht⁶ die energiepolitischen Kernziele und die im Rahmen der deutschen Nachhaltigkeitsstrategie aus dem Jahr 2002 verfolgten Nachhaltigkeitsziele (vgl. Bundesregierung 2002) einbezogen werden. Somit ließen sich Zielkonflikte – wie bspw. zwischen Klimaschutz, Luftreinhaltung und Wirtschaftlichkeit – frühzeitig identifizieren und ein Ausgleich zwischen diesen würde ggf. ermöglicht.

³ UNECE steht für *United Nations Economic Commission for Europe*.

⁴ Im Rahmen des in dieser Arbeit entwickelten Ansatzes wird der (tatsächliche) Energieverbrauch über eine Energiebedarfsberechnungsprozedur geschätzt, wobei durch entsprechende Anpassung der nutzerverhaltensabhängigen Parameter eine möglichst präzise Abschätzung erreicht werden soll. Daher werden die Begriffe *Energiebedarf* und *Energieverbrauch* als Synonyme verwendet, sofern nicht gezielt auf Unterschiede zwischen diesen eingegangen wird.

⁵ Der *Bereich Wärmenutzung* bezeichnet in dieser Arbeit die Umwandlungskette von der Primärenergie bis zur Nutzenergie (inkl. ihrer Nutzung). Instrumente dieses Bereichs betreffen u. a. Maßnahmen an Anlagentechnik und Gebäudehülle.

⁶ In dieser Arbeit wird die Sichtweise von Exekutive, Legislative und Förderer als Staatssicht bezeichnet. Es wird angenommen, dass diese die gesellschaftliche Sichtweise einnehmen.

Um politische Entscheidungsträger bei der Identifizierung adäquater umweltpolitischer Instrumentenbündel für einen vorgegebenen Betrachtungszeitraum zu unterstützen, werden auf nationaler Ebene häufig Wohngebäudebestandsmodelle eingesetzt. Mit diesen werden meist Entwicklungspfade⁷ des Gebäudebestands durch die Vorgabe von Sanierungspaketen aus Maßnahmen an Gebäudehülle und Anlagentechnik sowie zugehörigen Sanierungsraten simuliert und anschließend die gesamtwirtschaftlichen und ökologischen Folgen analysiert (z. B. Markewitz & Stein 2003). Vereinzelt werden die Anteile der Sanierungspakete an der Gesamtsanierungsrate bspw. durch die Verwendung von Diffusionsmodellen (vgl. Kapitel 3) auch modellendogen simuliert. Ein zentrales Defizit der eingesetzten Modelle ist, dass die Eigentümer und Bewohner der Gebäude weitgehend unberücksichtigt bleiben, obwohl diese – wie empirische Befunde zeigen (z. B. Stieß u. a. 2010; Testorf u. a. 2010) – einerseits entscheidenden Einfluss auf die Sanierungsrate und die Sanierungspakete nehmen und andererseits für die wirtschaftliche und soziale Vertretbarkeit von Entwicklungspfaden des Gebäudebestands maßgeblich sind. Ohne Kenntnisse über Eigentümer und Bewohner können weder ökonomische noch sonstige etwaige Sanierungshemmnisse wie die alters- und lebensmodellabhängige Wohnperspektive, die Bereitschaft zur Kreditaufnahme, der Zugang zu Informationen, das Vermieter-Mieter-Dilemma etc. adäquat berücksichtigt werden. Entsprechend sind Aussagen über die Eignung umweltpolitischer Instrumentenbündel diesbezüglich mit hohen Unsicherheiten behaftet. Weiterhin sind negative Auswirkungen, z. B. durch finanzielle Überforderung von Eigentümern, Mietern und Vermietern, sowie Mitnahmeeffekte nur unzureichend quantifizierbar und fließen bisher nicht adäquat in die Eignungsbeurteilung umweltpolitischer Instrumente im Bereich Wärmenutzung in Wohngebäuden ein. Insgesamt konzentriert sich die Bewertung von Entwicklungspfaden des Wohngebäudebestands meist auf die isolierte Betrachtung weniger Kenn-

⁷ Entwicklungspfade beschreiben die Veränderung eines Bestands (bspw. von Gebäuden und Haushalten) und seiner Charakteristika über die Zeit.

größen – wie bspw. CO₂-Emissionen, Primärenergiebedarf, Investitionen⁸ und Energiekosten – und lässt weitere Aspekte wie Luftschadstoffemissionen sowie deren räumliche Verteilung⁹, finanzielle Umverteilungswirkungen sowie Überlastungen einkommensschwacher Haushalte außer Acht.

Neben den Defiziten bei den Teilschritten Simulation und Bewertung von Entwicklungspfaden des Wohngebäudebestands weist auch der Gesamtansatz, der Wohngebäudebestandsmodellen zugrundeliegt, Verbesserungsmöglichkeiten auf. Da dieser Ansatz die Vorgabe von Instrumentenbündeln als Modelleinganggröße erfordert, wird durch derartige Modelle bisher weder eine hemmnis- und potenzialgetriebene Neu- bzw. Umgestaltung umweltpolitischer Instrumente noch eine Anpassung der Instrumentenbündel an unterschiedliche Zielgruppen unterstützt, obwohl beides zur effizienten Beseitigung von Sanierungshemmnissen beitragen kann. Zentrale Gründe hierfür umfassen neben der Nichtberücksichtigung der Eigentümer und Bewohner auch eine zu aggregierte Modellierung sowie methodische Lücken.

1.2 Zielsetzung, Forschungsfragen und Lösungsweg

Zielsetzung

Ziel der vorliegenden Arbeit ist die Entwicklung und Anwendung einer Methodik zur Identifizierung und Konzipierung adäquater Bündel umweltpolitischer Instrumente im Themenfeld Wärmenutzung in Wohngebäuden mit Fokus auf der energetischen Modernisierung. Das betrachtete System umfasst alle Wohngebäude in Deutschland sowie die zugehörigen Eigentümer und Bewohner. Der Betrachtungszeitraum reicht von 2006 bis 2030. Aus der oben beschriebenen Problemstellung ergeben sich drei wesentliche Anforderungen an die zu entwickelnde Methodik:

⁸ Der Begriff Investition wird in dieser Arbeit auch als Synonym zu der mit einer Investition verbundenen Anfangsauszahlung (bzw. -ausgabe) verwendet.

⁹ Die räumliche Verteilung ist relevant, da Luftschadstoffe überwiegend lokal bzw. regional wirken.

- Durch die integrierte Modellierung von Wohngebäuden sowie der Akteure Eigentümer und Bewohner¹⁰ soll einerseits die Abbildung von Sanierungshemmnissen verbessert und andererseits die finanzielle Überforderung von selbstnutzenden Eigentümern, Mietern und Vermietern sowie Mitnahmeeffekte quantifizierbar gemacht werden.
- Die Beurteilung der Adäquatheit potenzieller Instrumentenbündel soll sich an der deutschen Nachhaltigkeitsstrategie orientieren, um zukünftig eine Entscheidungsunterstützung im Bereich der Nachhaltigkeits- und Energiepolitik zu ermöglichen. Dabei sollen insbesondere Luftschadstoffemissionen sowie deren räumliche Verteilung, Umverteilungswirkungen und finanzielle Überlastungen einkommensschwacher Haushalte in die Betrachtung einbezogen werden.
- Durch die Modellierung der Entwicklungspfade des Wohngebäude- und Haushaltsbestands auf Mikroebene – d. h. auf der Ebene einzelner Gebäude und Haushalte – soll eine hemmnis- und potenzialgetriebene Neu- bzw. Umgestaltung umweltpolitischer Instrumente sowie eine Anpassung von Instrumentenbündeln an unterschiedliche Zielgruppen mittels multivariater statistischer Verfahren ermöglicht werden.

Forschungsfragen

Folgende Hauptforschungsfrage soll in der Arbeit beantwortet werden:

„Welche Bündel umweltpolitischer Instrumente sind für den Bereich der Wärmenutzung in Wohngebäuden geeignet, um die Treibhausgas- und Luftschadstoffemissionen sowie den Primärenergieverbrauch zu reduzieren?“

¹⁰ Nach Lützkendorf u. a. (2008) sind *Eigentümer* und *Bewohner* Rollen, die von unterschiedlichen Akteuren eingenommen werden können. Im Rahmen der vorliegenden Arbeit werden unter den Akteuren *Eigentümer* und *Bewohner* dahingegen vereinfachend diejenigen Akteure im Sinne von Lützkendorf u. a. (2008) verstanden, die die Rolle *Eigentümer* und *Bewohner* innehaben. Analoges gilt für Bezeichnungen wie selbstnutzende Eigentümer, Mieter und Vermieter. Selbstnutzende Eigentümer treten bspw. in den Rollen *Eigentümer* und *Bewohner* auf und gehören damit zu beiden Akteursgruppen.

Diese Frage wird durch folgende Teilfragen präzisiert:

- Wie groß sind die **(a)** technischen, **(b)** ökonomischen und **(c)** ausschöpfbaren¹¹ Reduktionspotenziale für Treibhausgas- und Luftschadstoffemissionen sowie den Primärenergieverbrauch?
- Hinsichtlich welcher Teilbereiche der Nachhaltigkeitsbewertung treten Zielkonflikte auf?
- Wie verteilen sich die techno-ökonomischen Potenziale auf sozio-demographische Cluster?
- Welche Akteure tragen die Hauptlasten der Transformation des Energiesystems Wärmenutzung in Wohngebäuden, und führt dies zur übermäßigen Belastung einkommensschwacher Haushalte?
- Wie können diese Hauptlasten verschoben werden, um die Transformation für Wohngebäudeeigentümer und -bewohner möglichst „zumutbar“ zu gestalten?

Lösungsweg

Folgender Lösungsweg wird zur Umsetzung dieser Ziele eingeschlagen:

Kapitel 2 gibt einen Überblick über den aktuellen Stand und die Entwicklung des Bereichs der Wärmenutzung im Wohngebäudebestand in Deutschland. Dabei wird zuerst auf die wärmenutzungsbedingten Emissionen an Luftschadstoffen und Treibhausgasen sowie den End- und Primärenergieverbrauch eingegangen, um die Relevanz des betrachteten Systems für den Umweltschutz zu verdeutlichen. Anschließend werden Gebäude- und Anlagentechniktypologien als zentrale Elemente zur Dekomposition der Gesamtemissionen und des Gesamtverbrauchs sowie bisherige Sanierungsaktivitäten in Bezug auf Gebäude-

¹¹ Das ausschöpfbare Potenzial sei definiert als der Teil des ökonomischen Potenzials, der in der Realität genutzt werden kann. Die Ausnutzung des ökonomischen Potenzials wird bspw. durch mangelnde Möglichkeiten zur Finanzierung, Informationsdefizite und Sanierungsunwilligkeit behindert (vgl. Kapitel 4). Das ausschöpfbare Potenzial ist daher neben den technischen und ökonomischen Randbedingungen des Gebäudes auch von umweltpolitischen Instrumenten sowie Charakteristika der Gebäudeeigentümer und -bewohner bzw. dem Entscheiderverhalten abhängig.

hülle und Anlagentechnik erläutert. Zum Abschluss des Kapitels wird eine Übersicht über die umweltpolitischen Instrumente im Bereich Wärmenutzung in Wohngebäuden sowie die umweltpolitischen Ziele und den internationalen Rahmen gegeben.

Kapitel 3 fasst den Stand der Wissenschaft des durch Zielsetzung und Forschungsfragen aufgespannten Themenfelds zusammen. Dabei wird basierend auf der Diskussion existierender Modelle die in dieser Arbeit behandelte Forschungslücke verdeutlicht. Im Fokus stehen dabei Wohngebäudebestandsmodelle sowie die Modellierung der Sanierungsentscheidung, als deren Weiterentwicklung bzw. Integration das im Rahmen dieser Arbeit entwickelte Modell interpretiert werden kann. Abschließend werden unter Berücksichtigung der identifizierten Forschungslücken Anforderungen an ein integriertes Wohngebäude- und Haushaltsmodell abgeleitet.

In Kapitel 4 werden die Akteure Wohngebäudeeigentümer und -bewohner in Hinsicht auf die energetische Sanierung charakterisiert. Differenziert nach selbstnutzenden Eigentümern sowie privaten und institutionellen Vermietern werden allgemeine Ziele des Gebäudeerwerbs, Gebäude und Technik, Sanierungsanlässe und -motive sowie Sanierungshemmnisse erörtert. Für Selbstnutzer wird zudem analysiert, ob ein Zusammenhang zwischen soziodemographischen Merkmalen und der Sanierungsaktivität besteht. Außerdem wird auf die Mieter und ihre sozio-demographischen Merkmale eingegangen, da sie von den Auswirkungen energetischer Sanierungen betroffen sind und derartige Sanierungen zumindest indirekt beeinflussen. Eine Charakterisierung des Akteursumfelds in Bezug auf die Sanierung rundet die Akteursbetrachtung ab. Abschließend werden Schlussfolgerungen für die Entwicklung eines integrierten Wohngebäude- und Haushaltsmodells gezogen.

In Kapitel 5 wird das *akteursbasierte Wohngebäude- und Haushaltsmodell AWOHM* entwickelt und formal beschrieben. Nach der Präzisierung der Modellanforderungen und einer Übersicht über die Struktur dieses szenario-basierten Simulationsmodells wird die Modellierung und Ermittlung des Start-

bestands der Simulation erläutert. Anschließend wird auf die Modellierung der Gebäude- und Haushaltsbestandsveränderung eingegangen. Zuletzt werden die Struktur der Szenarien, die u. a. die Ausgestaltung des umweltpolitischen Instrumentenbündels umfassen, und der Umgang mit Unsicherheiten beschrieben.

In Kapitel 6 werden der verwendete Bewertungsansatz und Verfahren zur Analyse des Modelloutputs formal dargestellt. Dabei wird zunächst auf das zur nachhaltigkeitsorientierten Bewertung der Gebäude- und Haushaltsbestandsentwicklungspfade eingesetzte Indikatorensystem eingegangen. Anschließend werden multivariate Analyseverfahren erweitert und angepasst, um die über die indikatorenbasierte Bewertung hinausgehenden Aspekte der Forschungsfragen beantworten zu können.

In Kapitel 7 wird die entwickelte Methodik für Deutschland und den Betrachtungszeitraum 2006 bis 2030 angewendet. Nach einer Plausibilisierung der Startbestandserstellung werden durch die szenariobasierte Simulation von Entwicklungspfaden des Gebäude- und Haushaltsbestands technische, ökonomische und ausschöpfbare Reduktionspotenziale für Treibhausgas- und Luftschadstoffemissionen sowie den Primärenergieverbrauch abgeschätzt. Eine Plausibilisierung der Bestandsveränderung und die Anwendung der multivariaten Analyseverfahren sind in diese übergeordnete Struktur eingebettet. Das Kapitel schließt mit der indikatorenbasierten Bewertung der simulierten Entwicklungspfade aus Staatssicht.

In Kapitel 8 werden Schlussfolgerungen zum entwickelten Modell gezogen und dieses kritisch gewürdigt. Basierend auf der Modellanwendung in Kapitel 7 werden zudem explizit die Hauptforschungsfrage und die Teilfragen beantwortet. Zuletzt wird ein Ausblick auf potenzielle zukünftige Forschungsarbeiten gegeben.

Eine Zusammenfassung in Kapitel 9 schließt die Arbeit ab.

Abbildung 1 fasst die Struktur der vorliegenden Arbeit zusammen.

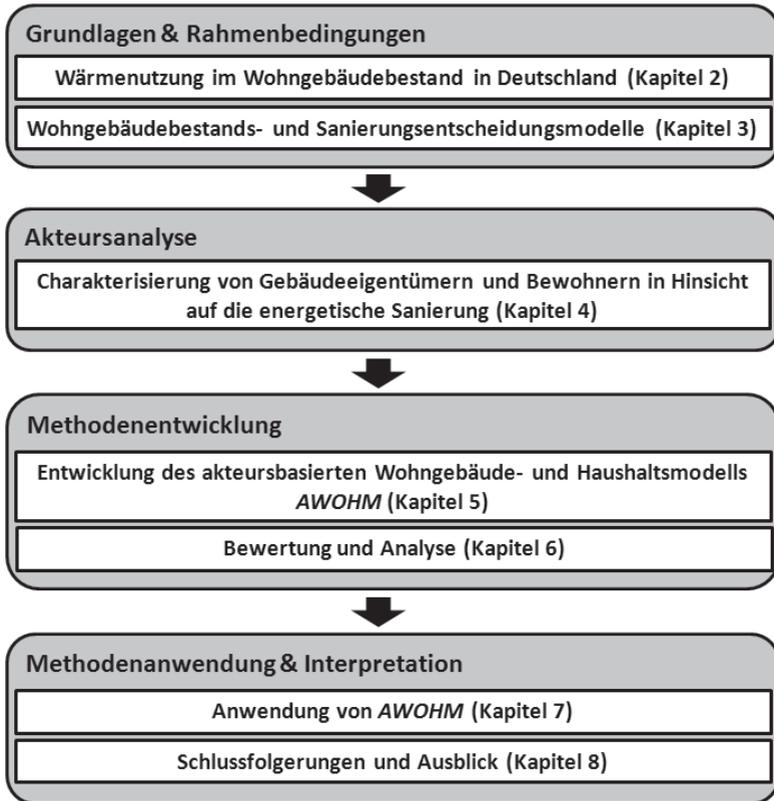


Abbildung 1: Struktur der vorliegenden Arbeit

2. Wärmenutzung im Wohngebäudebestand in Deutschland

Im vorliegenden Kapitel wird zunächst auf den End- und Primärenergieverbrauch¹² sowie die Luftschadstoff- und Treibhausgasemissionen eingegangen, welche durch die Wärmenutzung im Wohngebäudebestand bedingt werden. Anschließend werden Gebäude- und Anlagentechniktypologien vorgestellt, die zur differenzierten Analyse des Bereichs Wärmenutzung im Wohngebäudebestand benötigt werden. Abschließend wird eine Übersicht der umweltpolitischen Instrumente, die der Beeinflussung des Bereichs Wärmenutzung in Wohngebäuden dienen, der umweltpolitischen Ziele und des internationalen Rahmens gegeben.

2.1 Energieverbrauch sowie Luftschadstoff- und Treibhausgasemissionen

Die Wärmenutzung in Haushalten umfasst überwiegend die Anwendungsbereiche Raumwärme und Warmwasser. Der durch die Wärmenutzung bedingte Anteil der direkten Emissionen an den gesamten Emissionen der NECD¹³-Schadstoffe NMVOC, NO_x und SO₂, Feinstaub (PM₁₀ und PM_{2.5}) sowie der Treibhausgase CO₂ und CH₄ reichte für Deutschland im Jahr 2006 von 3% bis 18% (vgl. Abbildung 2). Im Falle von NO_x und SO₂ sind die indirekten Emissionen mit den direkten mengenmäßig vergleichbar. Die indirekten Emissionen gewinnen ihre Bedeutung dabei überwiegend durch die Vorketten der Energieträger Heizöl und Elektrizität bei NO_x sowie Gas, Heizöl und Elektrizität bei SO₂. Bei den übrigen Emissionen sind die Vorketten von untergeordneter Bedeutung. Der Anteil des durch die Wärmenutzung in Haushalten bedingten Endenergieverbrauchs am nicht erneuerbaren Primärenergieverbrauch lag

¹² Primärenergie wird für die Bereitstellung von Endenergie und Endenergie für die Bereitstellung von Nutzenergie eingesetzt. Vgl. DIN 4701-10 (2003) bez. Definitionen von Nutzenergiebedarf, Endenergiebedarf und Primärenergiebedarf.

¹³ NECD steht für *National Emissions Ceiling Directive*.

2006 bei 18%, derjenige des nicht erneuerbaren Primärenergieverbrauchs bei 20%. Die Wärmenutzung in Haushalten ist daher für die Luftreinhaltung, den Klimaschutz sowie den nicht erneuerbaren (und damit auch den gesamten) Primärenergieverbrauch von Bedeutung.

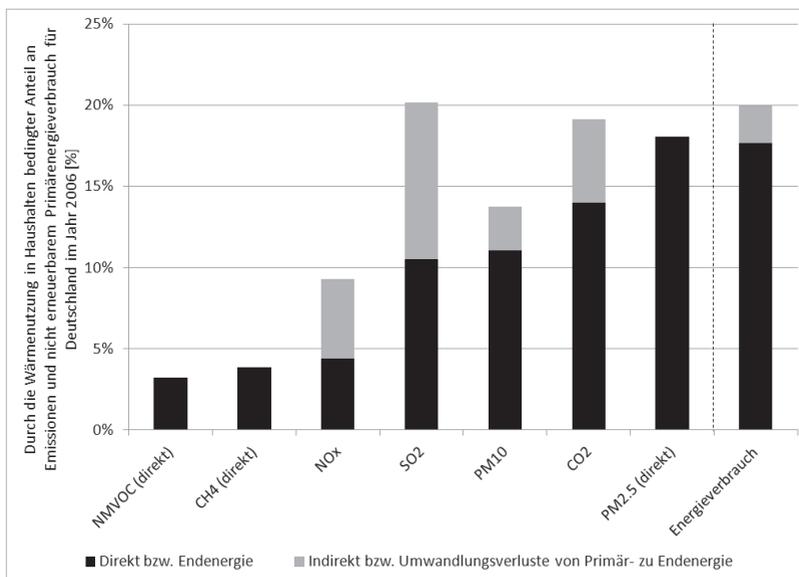


Abbildung 2: Durch die Wärmenutzung in Haushalten bedingter Anteil an ausgewählten Emissionen und dem nicht erneuerbaren Primärenergieverbrauch für Deutschland im Jahr 2006 (eigene Berechnung; Datengrundlage: Frondel u. a. 2011; Umweltbundesamt 2012a, 2012c; IINAS 2013)¹⁴

Die stärksten Emissionsreduktionen aus Feuerungsanlagen in Haushalten von 1990 bis 2011 traten mit 90% bei SO₂ auf (vgl. Abbildung 3), gefolgt von NMVOC mit 57%, CO₂ mit 52% und CH₄ mit 41%. Die NO_x-Emissionsreduktion fiel mit 35% moderat aus, und der Endenergieverbrauch der privaten Haushalte sank lediglich um 8%. Bei den Feinstaubemissionen war von 1995 bis 2011 sogar ein Anstieg um 24% bzw. 25% zu verzeichnen.

¹⁴ IINAS steht für *International Institute for Sustainability Analysis and Strategy*.

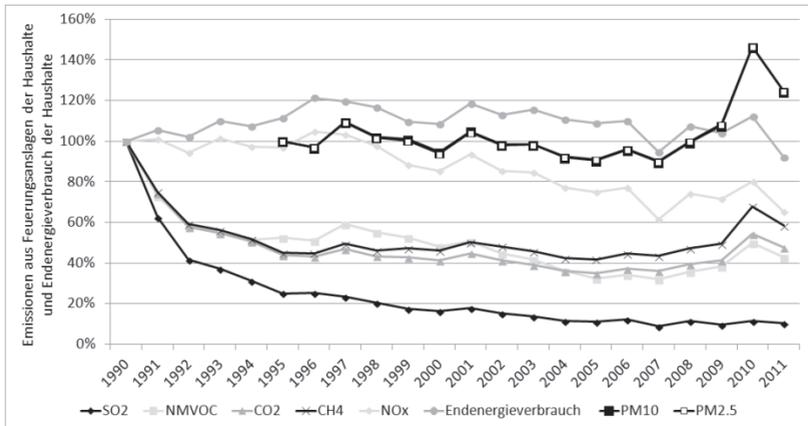


Abbildung 3: Entwicklung der Emissionen aus Feuerungsanlagen der Haushalte und des Endenergieverbrauchs von 1990 bis 2011 (Datengrundlage: Arbeitsgemeinschaft Energiebilanzen e.V. 2012; Umweltbundesamt 2012b)

2.2 Gebäude- und Wärmeerzeugertypologien zur Analyse von Energieverbrauch und Emissionen

Die adäquate Ausgestaltung umweltpolitischer Instrumente, die der Beeinflussung des Bereichs Wärmenutzung in Wohngebäuden dienen, erfordert eine detaillierte Analyse und Prognose von Zusammensetzung und Entwicklung der nationalen Werte für Energieverbrauch und Emissionen. Um derartige Analysen und Prognosen zu ermöglichen, werden Typen von Wohngebäuden und Wärmeerzeugern differenziert (z. B. IWU 2005; Struschka u. a. 2008)¹⁵. Neben dem Nutzerverhalten beeinflussen den wohnflächenspezifischen Nutzenergieverbrauch an Wärme insbesondere das Hüllflächen-Wohnflächen-Verhältnis und die (im Urzustand häufig zumindest grob baualtersabhängige) energetische Qualität der Gebäudehüllenkomponenten. Diesbezüglich ähnliche Gebäude werden für die Analyse des Energieverbrauchs zu Wohngebäudetypen zusammengefasst. Die Nutzenergie bereitstellenden Wärmeerzeuger weisen unterschiedliche Jahresnutzungsgrade sowie Emissions- und Primärenergiefak-

¹⁵ IWU steht für Institut Wohnen und Umwelt.

toren auf und beeinflussen somit den mit der Wärmenutzung verbundenen Energieverbrauch und die Emissionen. Wärmeerzeuger mit ähnlichen Charakteristika werden zu Wärmeerzeugertypen zusammengefasst. Für Deutschland ist insbesondere die im Mikrozensus¹⁶ 2006 verwendete Gebäude- und Wärmeerzeugertypologie des Statistischen Bundesamtes relevant. Der Mikrozensus basiert auf einer umfangreichen Stichprobe von 1% der Haushalte in Deutschland und verbindet Informationen über Gebäude, Wärmeerzeuger und Bewohner in Datensätzen auf Haushaltsebene. Da die Erhebung zudem alle vier Jahre durchgeführt wird, eignet sich der Mikrozensus besonders für eine umfassende Analyse des Wohngebäudebestands und dessen Entwicklung. Allerdings werden für die Berechnung des Energiebedarfs und der Emissionen zusätzliche Informationen benötigt, die anderweitig bereitgestellt werden müssen. Für Deutschland werden über die Wohngebäudetypologie vom IWU (2005) Daten bereitgestellt¹⁷, die eine Berechnung des spezifischen Nutzenergiebedarfs ermöglichen. Basierend auf dem Nutzenergiebedarf können mittels Daten der Wärmeerzeugertypologie von Struschka u. a. (2008) End- und Primärenergiebedarf sowie Emissionen ermittelt werden. Diese drei zentralen Typologien, die bei einigen identischen oder ähnlichen Merkmalen unterschiedliche Ausprägungen aufweisen, müssen hierfür geeignet kombiniert werden und werden daher im Folgenden beschrieben.

2.2.1 Gebäude- und Wärmeerzeugertypologie im Mikrozensus

Die Gebäude- und Wärmeerzeugertypologie im Mikrozensus (vgl. Statistisches Bundesamt 2008c) unterscheidet Wohngebäude, Wohnheime, sonstige Gebäude mit Wohnraum und ständig bewohnte Unterkünfte (Merkmal EF489¹⁸).

¹⁶ Nach Angaben der Statistischen Ämter des Bundes und der Länder (2014) ist der Mikrozensus eine jährliche Haushaltsbefragung mit einer Stichprobe von 1% der Haushalte in Deutschland. Alle vier Jahre werden, wie im Jahr 2006, zusätzliche Fragen zur Wohnsituation gestellt.

¹⁷ Bereits erfolgte energetische Modernisierungen bleiben dabei aber weitgehend unberücksichtigt.

Im Rahmen dieser Arbeit werden lediglich die Wohngebäude betrachtet, da die Wohneinheiten (WE), die sich nicht in Wohngebäuden befinden, im Vergleich zu den in Wohngebäuden befindlichen Wohneinheiten mit ca. 1% Anteil am Gesamtbestand vernachlässigbar sind. Zentrale Differenzierungsmerkmale der Wohngebäudetypologie sind das Baujahr des Gebäudes bzw. der Wohnung (EF493) mit den Ausprägungen <1919, 1919-1948, 1949-1978, 1979-1990, 1991-1995, 1996-2000, 2001-2004 und 2005-2006 sowie die Anzahl der sich in dem Gebäude befindenden Wohneinheiten (EF490, EF635) mit den Ausprägungen 1 WE, 2 WE, 3-6 WE, 7-12 WE, 13-20 WE und >20 WE. Die Größe der Wohnungen wird als Fläche der gesamten Wohnung (EF492, einschl. Küche, Bad, Toilette, Flur, Mansarde, anrechenbarer Balkonfläche oder untervermieteter sowie gewerblich genutzter Räume) in m² angegeben. Als Eigentümerstrukturen (EF491) werden die Ausprägungen Eigentümer(in) des Gebäudes, Eigentümer(in) der Wohnung, Hauptmieter(in) und Untermieter(in) unterschieden. Hinsichtlich der Wärmeversorgung werden die überwiegend für die Raumwärmebereitstellung und die Warmwasserbereitstellung verwendeten Energieträger sowie Angaben zur Zentralität der Wärmeversorgung ausgewiesen. Zudem stehen Merkmale zur räumlichen Differenzierung sowie soziodemographische Merkmale der Bewohner zur Verfügung, auf die in Abschnitt 5.3 detailliert eingegangen wird.

Abbildung 4 zeigt für Deutschland im Jahr 2006 differenziert nach Baualterklassen die Anzahl der Wohneinheiten bezogen auf die Länge der Baualterklassen. Gebäude der Baualterklasse 1949-1978 sind im Wohngebäudebestand im Vergleich überproportional vertreten, was auf eine erhöhte Bautätigkeit nach dem 2. Weltkrieg zurückgeführt werden kann. Auch der hohe Anteil an Gebäuden mit mindestens drei Wohneinheiten kann durch nachkriegsbedingte Bautätigkeit in Städten und zügige Wohnraumversorgung erklärt wer-

¹⁸ EF (Eingabefeld) und die jeweilige Nummerierung beziehen sich auf das Schlüsselverzeichnis des Mikrozensus 2006 (vgl. Statistisches Bundesamt 2008c).

den. Da die Gebäude dieser Baualtersklasse fast ausschließlich vor der 1. Wärmeschutzverordnung – inkraftgetreten am 1.11.1977 – erbaut wurden, verfügten Sie im Urzustand über einen im Vergleich zu aktuellen Anforderungen an Neubau und Sanierung (vgl. Abschnitt 2.3) niedrigen baulichen Wärmeschutz. Unterstellt man Sanierungszyklen von 20 und 40 Jahren für Teil- und Vollsanierungen, so durchlaufen diese Gebäude noch bis zum Jahr 2018 ihren ersten Vollsanierungszyklus und ab dem Jahr 2009 ihren zweiten Teilsanierungszyklus. Damit bietet diese Gruppe im Zeitraum von 2006-2030 ein Potenzial zur energetischen Modernisierung. Auch die Baualtersklasse 1979-1990, die ihren ersten Vollsanierungszyklus ab 2019 durchläuft, ist überproportional im Gebäudebestand vertreten und weist entsprechende Modernisierungspotenziale auf, obwohl die Gebäude nach dem Inkrafttreten der 1. bzw. 2. Wärmeschutzverordnung in den Jahren 1977 bzw. 1982 gebaut wurden.

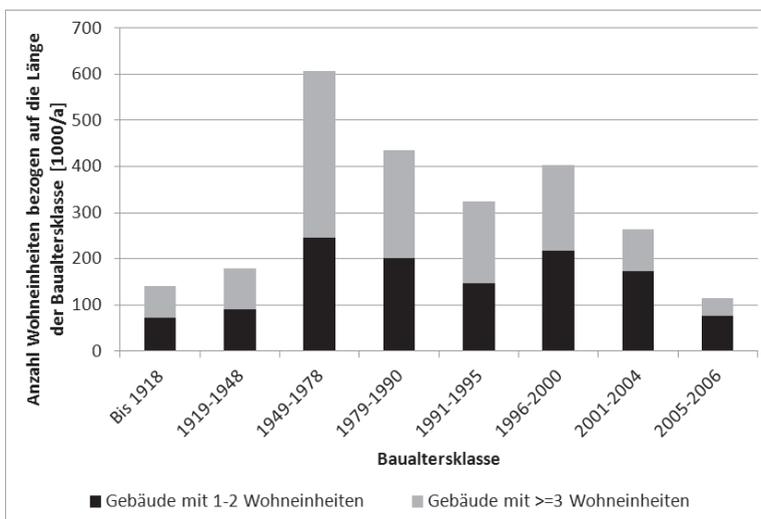


Abbildung 4: Anzahl der Wohneinheiten bezogen auf die Länge der Baualtersklassen im Jahr 2006 für Deutschland (Datengrundlage: Statistisches Bundesamt 2008a)

Die Eigentumsstruktur der im Jahr 2006 39,3 Mio. Wohneinheiten in Deutschland variiert stark mit der Anzahl der Wohneinheiten im Gebäude. Der Anteil

an vom Eigentümer bewohnten Wohneinheiten sinkt von 83% für Gebäude mit 1 Wohneinheit über 41% bei 2 Wohneinheiten und 19% bei 3 bis 6 Wohneinheiten bis auf 11% für Gebäude mit mindestens 7 Wohneinheiten. Diese Variation der Eigentumsstruktur sollte bei der Ausgestaltung von Bündeln umweltpolitischer Instrumente in Betracht gezogen werden.

Die Zentralität der Raumwärmebereitstellung variiert stark mit der Baualterklasse. Während die Raumwärmebereitstellung mittels Block-, Zentral- und Etagenheizung prinzipiell dominiert, sinkt der Anteil von Einzel- und Mehrraumöfen von 15% und 11% bei den Baualterklassen bis 1918 und 1919-1948 über 7% und 5% bei den Baualterklassen 1949-1978 und 1979-1990 bis auf 2-3% in den übrigen Baualterklassen. Der Anteil an Fernheizungen ist in den Baualterklassen 1979-1990 und 1949-1978 mit 20% bzw. 16% am höchsten. Unter den mit Block-, Zentral-, Etagen- und Fernheizung versorgten Wohneinheiten wurden Gas (51%), Heizöl (32%) und Fernwärme (14%) am häufigsten als überwiegend für die Raumwärmebereitstellung verwendeter Energieträger angegeben. Im Falle von Einzel- und Mehrraumöfen dominiert Elektrizität (Strom) mit 46%, gefolgt von Holz oder sonstigen erneuerbaren Energien (16%), Gas (15%), Heizöl (13%) und Briketts bzw. Braunkohle (8%). Für die Warmwasserbereitung werden Gas (41%), Heizöl (25%) und Elektrizität (20%) am häufigsten als überwiegend verwendeter Energieträger eingesetzt.

2.2.2 Wohngebäudetypologie vom Institut Wohnen und Umwelt

Die Wohngebäudetypologie „Deutsche Gebäudetypologie – Systematik und Datensätze“ vom IWU (2005), die auf für Deutschland grundlegenden Vorarbeiten basiert (vgl. Ebel u. a. 1990, 1995, 1996; Eicke-Hennig u. a. 1994), kann für die energetische Analyse des Wohngebäudebestands in Deutschland herangezogen werden. Die Gebäude werden anhand der Merkmale Gebäudetyp und Baualterklasse differenziert. Bez. des Merkmals Gebäudetyp werden die acht Ausprägungen Reihenhaus (RH), Einfamilienhaus (EFH), Mehrfamilienhaus

(MFH), Mehrfamilienhaus in den neuen Bundesländern (MFH_NBL), Großes Mehrfamilienhaus (GMH), Großes Mehrfamilienhaus in den neuen Bundesländern (GMH_NBL), Hochhaus (HH) und Hochhaus in den neuen Bundesländern (HH_NBL) unterschieden. Abgesehen von den Sonderbauten¹⁹ in den neuen Bundesländern werden in Abhängigkeit vom Gebäudetyp für das Merkmal Baualtersklasse maximal die zehn Ausprägungen <1919 (Fachwerk), <1919 (Massivbau), 1919-1948, 1949-1957, 1958-1968, 1969-1978, 1979-1983, 1984-1994, 1995-2001 und 2002-2006 differenziert. Für die Sonderbauten in den neuen Bundesländern werden die Baualtersklassen 1946-1960 und 1961-1969 für MFH_NBL, 1970-1980, 1981-1985 und 1986-1990 für GMH_NBL sowie 1970-1980 und 1981-1985 für HH_NBL unterschieden. Die Baualtersklassen werden mittels Buchstaben von A (<1919, Fachwerk) bis J (2002-2006) kodiert.²⁰ EFH_A bezeichnet bspw. Fachwerkeinfamilienhäuser mit Baujahr bis (einschließlich) 1918. Zu jeder Kombination aus Gebäudeklasse und Baualtersklasse werden für einen realen (weitgehend nicht energetisch modernisierten) Repräsentanten u. a. die beheizte Wohnfläche [m²], das beheizte Gebäudevolumen [m³], die Bauteilflächen [m²] und Wärmedurchgangskoeffizienten²¹ [W/(K*m²)] vom oberen Gebäudeabschluss, den Außenwänden und dem unteren Gebäudeabschluss im Ist-Zustand angegeben. Zu den Fenstern im Ist-Zustand werden neben den Fensterflächen [m²] und den Wärmedurchgangskoeffizienten [W/(K*m²)] zudem g-Werte²² (Gesamtenergiedurchlassgrade) und die Orientierungen (Süd-Fensterflächen, West-/Ost-Fensterflächen, Nordfensterflächen) angegeben. Die Daten dieser Typologie ermöglichen die Be-

¹⁹ Dies sind Mehrfamilienhäuser, große Mehrfamilienhäuser und Hochhäuser industrieller Bauweise („Plattenbauten“).

²⁰ Die Sonderbauten werden von D (1946-1960) bis H (1986-1990) kodiert.

²¹ Der Wärmedurchgangskoeffizient (U-Wert) „gibt an, welche Wärmemenge durch 1 m² eines Bauteils strömt, wenn die Temperaturdifferenz zwischen der inneren und der äußeren Oberfläche des Bauteils 1 Kelvin beträgt“ (Lünser 2005).

²² Der Gesamtenergiedurchlassgrad (g-Wert) „gibt an, welcher Anteil der auf ein Fenster einstrahlenden Sonnenenergie die Scheiben passieren kann“ (Lünser 2005).

rechnung des Nutzenergiebedarfs bzw. die Schätzung des Nutzenergieverbrauchs nach dem von Loga & Imkeller-Benjes (1997) beschriebenen Ansatz, sofern bereits erfolgte energetische Modernisierungen entsprechend berücksichtigt²³ werden.

Abbildung 5 zeigt den derart geschätzten mittleren wohnflächenspezifischen Nutzenergieverbrauch für die Raumheizung im Jahr 2006²⁴ für Deutschland differenziert nach Gebäudetypen und Baualtersklassen ohne Sonderbauten in den neuen Bundesländern. Energetische Modernisierungen, die bis zum Jahr 2006 erfolgten, sind dabei bereits berücksichtigt (vgl. Stengel u. a. 2012). Die berechnete Schwankungsbreite des Nutzenergieverbrauchs – bspw. für EFH von 85 bis 261 kWh/(m² a) – kann als Indiz für die Größe der Potenziale zur Nutzenergieverbrauchsreduktion durch energetische Modernisierungen der Gebäudehülle herangezogen werden. Die tatsächlichen Potenziale hängen allerdings von weiteren, teils zwischen den (Repräsentanten der) Baualtersklassen unterschiedlichen Parametern, wie z. B. dem Anteil der verglasten Fläche und der Anbausituation, ab. Im Zeithorizont 2006-2030 erreichen die Gebäude mit den Baujahren 1966-1990 und 1926-1950 ihren ersten bzw. zweiten Vollsanierungszyklus. Auch Gebäude mit Baujahr vor 1918 können einen Vollsanierungszyklus erreichen. Demnach steht bei Gebäuden aus allen Baualtersklassen mit einem Nutzenergieverbrauch für die Raumheizung von über 200 kWh/(m² a) eine Sanierung der Gebäudehülle an. Für eine detaillierte Erläuterung der dargestellten Werten sei auf Stengel u. a. (2012) verwiesen.

²³ Vgl. Stengel u. a. (2012) bez. des in Vorarbeiten für die vorliegende Arbeit verwendeten und Abschnitt 5.3 bez. des in dieser Arbeit weiterentwickelten Ansatzes für die Berücksichtigung bereits erfolgter energetischer Modernisierungen.

²⁴ Wohngebäude mit Baujahr ab 2006 werden in Kapitel 5 berücksichtigt.

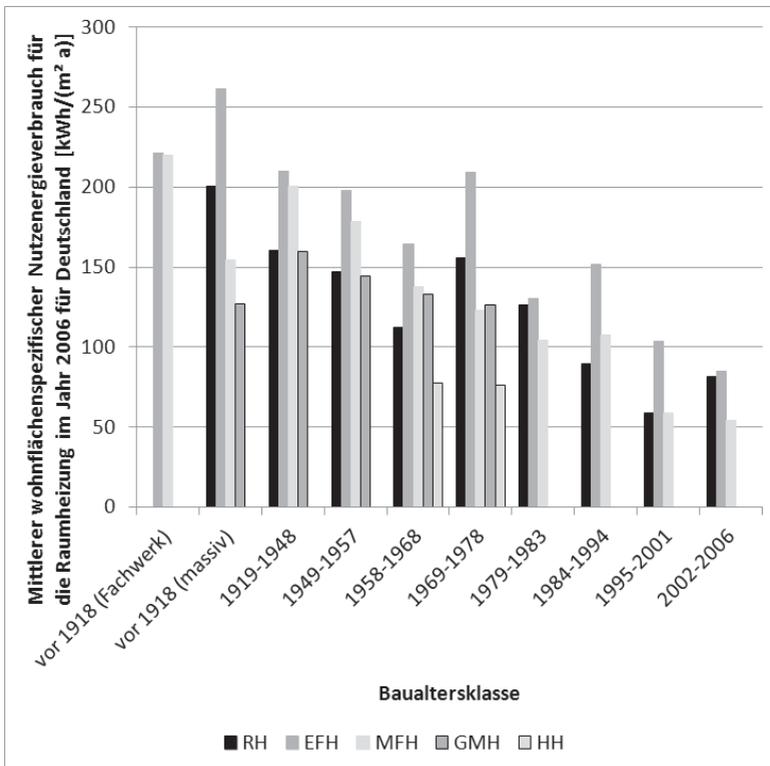


Abbildung 5: Mittlerer wohnflächenspezifischer Nutzenergieverbrauch für die Raumheizung im Jahr 2006 für Deutschland differenziert nach Gebäudetyp (ohne Sonderbauten in den neuen Bundesländern) und Baualterklasse (Datengrundlage: Stengel u. a. 2012)

2.2.3 Wärmeerzeugertypologie von Struschka u. a.

Ausgehend vom Nutzenergieverbrauch für Raumheizung und Warmwasser können End- und Primärenergieverbrauch sowie Treibhausgas- und Luftschadstoffemissionen mittels Jahresnutzungsgraden sowie Primärenergie- und Emissionsfaktoren bestimmt werden. Die Wärmeerzeugertypologie von Struschka u. a. (2008) differenziert für Haushalte Feuerungstechniken sowie zugehörige Brennstoffe, Leistungsklassen und Altersklassen. Ein derartiges

Quadrupel definiert einen Wärmeerzeugertyp, zu dem ebenfalls Emissionsfaktoren für Treibhausgase und Luftschadstoffe, der Wärmeerzeugerbestand in Deutschland sowie weitere Daten angegeben werden. Jahresnutzungsgrade und Primärenergiefaktoren können bspw. von Pistoohl (2000) und aus DIN EN 15603 (2008) übernommen werden. Für die Wärmebereitstellung im Wohngebäudebestand in Deutschland sind neben den auf Feuerungstechniken basierenden Wärmeerzeugertypen zudem Wärmeerzeuger (bzw. Wärmebereitsteller), die Elektrizität, Solarthermie, Fernwärme oder Umgebungs- bzw. Erdwärme nutzen, relevant.

Bei den Feuerungstechniken werden die vier Leistungsklassen *0-15 kW*, *4-25 kW*, *25-50 kW* und *>50 kW* und bez. des Einbaujahrs die drei Altersklassen *bis 1989*, *1990-2006* und *2005-2006* unterschieden. Als Feuerungstechniken werden für den Energieträger Erdgas Gasbrenner mit und ohne Gebläse, Brennwertgeräte, Raumheizer, Durchlaufwasserheizer, Kombiwasserheizer und Vorratswasserheizer differenziert. Die Feuerungstechniken mit Energieträger Heizöl werden in Heizkessel mit Ölgebläsebrenner, Brennwertgeräte und Ölöfen mit Verdampfungsbrenner unterteilt. Für den Energieträger Holz bzw. Holzpellets werden handbeschickte Heizkessel, Heizkessel für Pellets, Dauerbrandöfen, Kachelöfen, Kamine, Kaminöfen und Pelletöfen betrachtet. Für Steinkohle bzw. Steinkohlekoks werden Dauerbrandöfen, Kachelöfen und Heizkessel unterschieden, für Braunkohlebriketts zudem noch Kamine.

Abbildung 6 zeigt den Wärmeerzeugerbestand privater Haushalte für Deutschland im Jahr 2006 und über alle Feuerungstechniken je Energieträger gemittelte direkte CO₂-, NO_x-, SO₂-, VOC-, CH₄- und PM-Emissionsfaktoren, basierend auf Daten von Struschka u. a. (2008). Die am weitesten verbreiteten Feuerungen verwenden Erdgas, gefolgt von Holz bzw. Holzpellets und Heizöl. Steinkohle, Steinkohlekoks und Braunkohlebriketts nutzende Feuerungsanlagen sind zusammen mit 2,3 Mio. Anlagen vertreten. Die hohe Anzahl an Feuerungen mit festen Brennstoffen kann zumindest teilweise durch deren häufige Nutzung als Nebenfeuerstätte erklärt werden. Wärmeerzeuger mit Erdgas und Heizöl wei-

sen in Bezug auf VOC-, CH₄- und PM-Emissionen klare Vorteile im Vergleich zu den Festbrennstoffe nutzenden Feuerungen auf. Die niedrigsten SO₂-Emissionen weisen Erdgas, Holz und Holzpellets nutzende Feuerungen auf. Hinsichtlich NO_x- und CO₂-Emissionen sind die Unterschiede zwischen den (mittleren) Emissionsfaktoren geringer als bei den anderen Emissionsarten. Bei den CO₂-Emissionen werden hierbei allerdings nicht nur die CO₂-Emissionen aus fossilen Brennstoffen berücksichtigt. Die Gaskessel weisen durchweg eine günstige Emissionscharakteristik auf. Die Emissionsfaktoren einzelner Feuerungstechniken können aber bedeutend von den dargestellten Mittelwerten abweichen. Die NO_x-Emissionsfaktoren von gasbefeuerten Wärmeerzeugern schwanken bspw. zwischen 5 und 54 kg/TJ. Somit kann eine reine Differenzierung nach Energieträgern nur eine erste Übersicht geben und keine detaillierte Betrachtung ersetzen.

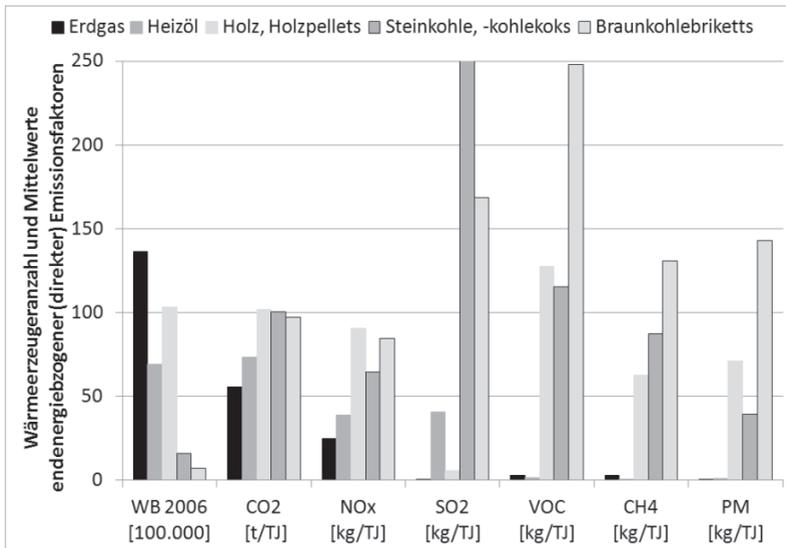


Abbildung 6: Wärmeerzeugerbestand privater Haushalte für Deutschland im Jahr 2006 und über alle Feuerungstechniken je Energieträger gemittelte direkte CO₂-, NO_x-, SO₂-, VOC-, CH₄- und PM-Emissionsfaktoren (eigene Berechnung; Datengrundlage: Struschka u. a. 2008); WB: Wärmeerzeugerbestand

2.2.4 Bisherige Modernisierungsaktivitäten

Durch die bisherigen Modernisierungsaktivitäten wurden (ca. seit den 1980er-Jahren (vgl. Cypra 2010)) bis 2009/2010 gemäß Abbildung 7 im Wohngebäudebestand 37% der Flächen von Dächern (bzw. obersten Gebäudeabschlüssen), 16% der Außenwandflächen sowie 8% der Flächen von Fußböden (bzw. Kellerdecken) nachträglich gedämmt. Bereits im Urzustand gedämmt wurden zwischen 20% und 34% der Bauteile. Dass im Jahr 2009/2010 29% der Dachflächen, 64% der Außenwandflächen und 66% der Fußböden noch ungedämmt waren, verdeutlicht, dass ein großer Teil des Energieeffizienzpotenzials durch Dämmung im Wohngebäudebestand noch nicht ausgeschöpft wurde. Eine Einschränkung der Betrachtung auf Wohngebäude mit Baujahr bis 1978 zeigt, dass der höhere Anteil nachträglich gedämmter Bauteilflächen den niedrigeren Anteil der Bauteilflächen mit Dämmung im Urzustand bis zum Jahr 2009/2010 noch nicht kompensieren konnte. Daher resultieren höhere Anteile ungedämmter Bauteilflächen von 38% für Dachflächen, 72% für Außenwandflächen und 80% für Fußböden. Prinzipiell bieten zudem auch bereits gedämmte Bauteilflächen Energieeffizienzpotenziale, sofern Modernisierungsvarianten mit niedrigeren Wärmedurchgangskoeffizienten existieren.

Im Jahr 2009/2010 waren nach Diefenbach u. a. (2010) 28% der Fenster des Wohngebäudebestands älter als 25 Jahre, 56% älter als 15 Jahre und 75% älter als 10 Jahre. Insbesondere bei den älteren Fenstern bieten sich somit Energieeffizienzpotenziale durch den Einbau von Zwei- oder Drei-Scheiben-Wärmeschutzverglasung. Informationen zu Wärmeerzeugern mit Feuerung wurden bereits in Abschnitt 2.2.3 gegeben. Der Anteil von Wohngebäuden mit solarthermischer Anlage wird von Diefenbach u. a. (2010) mit 9% angegeben. Der Anteil von Wohngebäuden mit (überwiegend elektrischen) Wärmepumpen wird mit 1% für Altbauten bis 1978, 2% für Baujahre von 1979-2004 und 21% für den Neubau beziffert. Für den Gebäudebestand sind Wärmepumpen demnach bisher von untergeordneter Bedeutung.

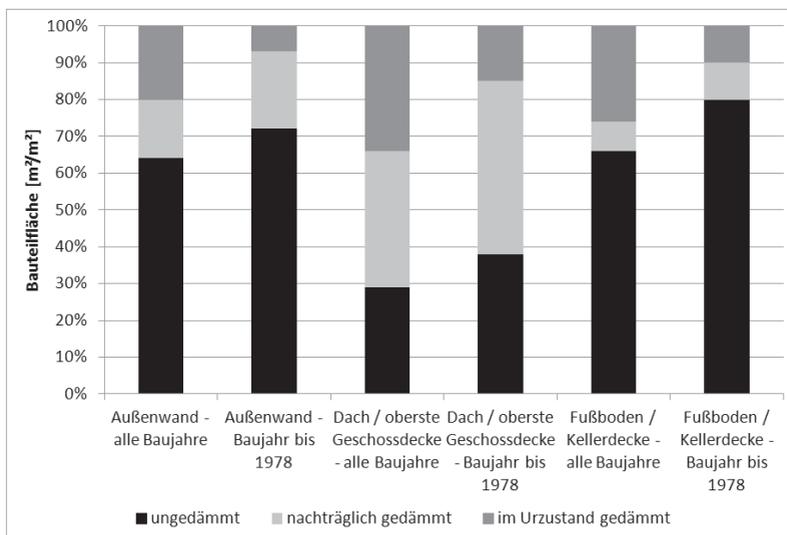


Abbildung 7: Anteile ungedämmter, nachträglich gedämmter und im Urzustand gedämmter Bauteilflächen im Wohngebäudebestand in Deutschland im Jahr 2009/2010 (Datengrundlage: Diefenbach u. a. 2010)

Mit einem Anteil von 20% am hessischen Gebäudebestand für den „Wärmeschutz nach Altbauanforderungen nach EnEV für die gesamte Gebäudehülle“²⁵ nennen Diefenbach & Enseling (2007) einen aggregierten Wert für die Gebäudehüllensanierung. Kretschmer (2006) gibt für den Anteil energetisch modernisierter Sonderbauten in den neuen Bundesländern 40% an. Diese Sonderbauten wurden aufgrund von Baumängeln teilweise vorzeitig saniert.

Sanierungs- bzw. Modernisierungsraten können zur Charakterisierung der Modernisierungsaktivitäten herangezogen verwendet, wobei die Definitionen dieser Raten teilweise voneinander abweichen. Bei der Annahme von Sanierungszyklen von 40 Jahren für die Gebäudehülle und 20 Jahren für die Wärmeerzeuger resultierten bei einer Gleichverteilung der Baujahre und ohne den

²⁵ EnEV steht für Energieeinsparverordnung.

Abbruch²⁶ von Gebäuden theoretische jährliche Sanierungsraten von 2,5% für die Gebäudehülle und 5% für die Wärmeerzeuger. Zur Charakterisierung des tatsächlichen Modernisierungsgeschehens nennen Kleemann & Hansen (2005) eine jährliche energetische Sanierungsrate von 1,3% für den deutschen und Diefenbach & Enseling (2007) eine Vollsanierungsrate von 0,75% für den hessischen Gebäudebestand. Diese unterschreiten die theoretische Sanierungsrate von 2,5% p. a. für die Gebäudehülle und die im Rahmen der Energiewende anvisierte Gebäudesanierungsrate von 2% p. a. (Bundeskabinett 2010). Diefenbach u. a. (2010) differenzieren zwischen jährlichen Modernisierungsraten für die Wärmedämmung von Außenwand (0,76% für 2000-2004; 0,65% für 2005-2008), Dach / oberste Geschossdecke (1,68% für 2000-2004; 1,20% für 2005-2008), Fußboden / Kellerdecke (0,27% für 2000-2004; 0,25% für 2005-2008) sowie für Fenster (1,34% für 2005-2009) und Wärmeerzeuger (2,8% für 2005-2009). Dabei ist einerseits ein Absinken der Modernisierungsaktivität von 2000-2004 zu 2005-2009 zu beobachten. Zudem liegen auch all diese Modernisierungsraten unter den entsprechenden theoretischen bzw. anvisierten Raten.

2.3 Rechtliche Rahmenbedingungen

2.3.1 Umweltpolitische Instrumente

In Deutschland existiert eine Vielzahl umweltpolitischer Instrumente mit den Zielen Luftreinhaltung und Klimaschutz, welche den Bereich Wärmenutzung in Wohngebäuden beeinflussen. Prinzipiell können dabei bspw. nach Wietschel u. a. (2002) Instrumente der Privatwirtschaft (Unternehmensinitiativen, Selbstverpflichtungen) und des Staates (hoheitliche Instrumente) unterschieden werden. Letztere, aus Sicht von Exekutive, Legislative und Förderer zentralen

²⁶ Im Rahmen dieser Arbeit wird der Abgang von Gebäuden aus dem Bestand vereinfachend als Abriss oder Abbruch bezeichnet. Für Ausführungen zum konventionellen Abbruch, zum selektiven Gebäuderückbau bzw. zur Demontage sowie zu deren Abgrenzung sei auf Rentz u. a. (1997, 1998) sowie Schultmann (1998) verwiesen.

Instrumente, können bspw. nach Michaelis (1996) in ordnungsrechtliche, ökonomische und suasorische Instrumente unterteilt werden. Tabelle 1 fasst ohne Anspruch auf Vollständigkeit für Deutschland die aus Staatssicht zentralen, für den Bereich Wärmenutzung in Wohngebäuden im Jahr 2013 eingesetzten und potenziellen zukünftigen umweltpolitischen Instrumente zusammen. Bez. einer Darstellung der Vielzahl an Instrumenten mit untergeordneter Bedeutung sei auf Matthes u. a. (2013) verwiesen. Auch die zahlreichen umweltpolitischen Instrumente auf Ebene der Bundesländer sowie auf regionaler und lokaler Ebene werden nicht betrachtet.

Tabelle 1: Zentrale umweltpolitische Instrumente für den Bereich Wärmenutzung in Wohngebäuden in Deutschland im Jahr 2013 auf nationaler Ebene (auf Basis von: Matthes u. a. 2013)

Kategorie	Aktuell	Zukünftig (zusätzlich)
Ordnungsrechtlich	Energieeinsparverordnung; 1. BImSchV (erste Verordnung zur Durchführung des Bundes-Immissionsschutzgesetzes); Erneuerbare-Energien-Wärmegesetz	Vereinfachungen von Sanierungen im Mietwohnungsmarkt; Mindesteffizienzstandards für Heizungssysteme (EU-Verordnung)
Ökonomisch	Marktanreizprogramm „Erneuerbare Energien“; KfW-Programm „Energieeffizient Sanieren“; Energiesteuer	Steuerliche Förderung von energetischen Sanierungsmaßnahmen
Suasorisch	Suasorisches Instrumentenbündel (u. a. Energieberatung und Energieausweise)	

2.3.1.1 Ordnungsrechtliche Instrumente

Durch die auf dem Energieeinspargesetz basierende **Energieeinsparverordnung 2009** werden im weiteren Sinne Anforderungen an Wärmeschutz und Anlagentechnik von Gebäuden sowie die zugehörige Transparenz gestellt (vgl. EnEG 2009; EnEV 2009).²⁷ Für zu errichtende Wohngebäude sind u. a. der nicht erneuerbare Jahres-Primärenergiebedarf für Heizung, Warmwasserbereitung, Lüftung und Kühlung sowie der Transmissionswärmeverlust begrenzt. Bei wesentlichen Änderungen von Bauteilen werden maximale Wärmedurchgangskoeffizienten für Außenbauteile angegeben bzw. auch der nicht erneuerbare Jahres-Primärenergiebedarf begrenzt. Bei der Inbetriebnahme von Wärmeerzeugersystemen werden Erzeugeraufwandszahl und Primärenergiefaktor beschränkt. Für bestehende Wohngebäude existieren zudem Nachrüstver-

²⁷ EnEG steht für Energieeinsparungsgesetz.

pflichtungen für Heizkessel, Wärmeverteilungs- und Warmwasserleitungen, die oberste Geschossdecke bzw. das Dach sowie elektrische Speicherheizsysteme (nur bis 2013). Zudem existieren Pflichten in Bezug auf die Ausstellung von Energieausweisen sowie deren Übergabe an Dritte. Im Falle „unbilliger Härte“ können Wohngebäudeeigentümer von allen Anforderungen befreit werden. Dies ist bspw. der Fall, wenn eintretende Einsparungen nicht innerhalb „angemessener Frist“ erwirtschaftet werden können. Die der Energieeinsparverordnung 2009 folgende Novelle der Energieeinsparverordnung, die EnEV 2014, sieht unter anderem Verschärfungen hinsichtlich der erwähnten Anforderungen für zu errichtende Wohngebäude vor (vgl. EnEV - Kabinettsbeschluss der Bundesregierung 2013). Änderungen der Begrenzung der Wärmedurchgangskoeffizienten für Außenbauteile bei wesentlichen Änderungen von Bauteilen sind nicht vorgesehen. Vorgänger bzw. Vorläufer der Energieeinsparverordnung 2009 waren die Energieeinsparverordnungen von 2007 und 2002 bzw. die Wärmeschutz- und Heizungsanlagenverordnungen (Cypra 2010).

Durch die auf dem Bundes-Immissionsschutzgesetz (BImSchG) basierende **erste Verordnung zur Durchführung des Bundes-Immissionsschutzgesetzes** (1. BImSchV) werden für kleine und mittlere Feuerungsanlagen u. a. zulässige Brennstoffe aufgelistet sowie Grenzwerte für Staub-, CO- und NO_x-Emissionen sowie Abgasverluste und maximal zulässige Rußzahlen angegeben (vgl. 1. BImSchV 2010; BImSchG 2012). Zudem werden Pflichten zur Ausstattung von Festbrennstofffeuerungen mit nachgeschalteten Einrichtungen zur Staubminderung formuliert, und es wird insgesamt die Überwachung und Messung durch Schornsteinfeger geregelt. Die ursprüngliche Fassung der 1. BImSchV trat 1974 in Kraft und wurde mehrfach geändert.

Das 2009 in Kraft getretene **Erneuerbare-Energien-Wärmegesetz** verpflichtet u. a. Eigentümer von Wohngebäuden, die neu errichtet werden, zu einer anteiligen Deckung des Wärme- und Kälteenergiebedarfs mit erneuerbaren Energien oder, alternativ, zur Durchführung von Ersatzmaßnahmen (vgl.

EEWärmeG 2008). Die Ersatzmaßnahmen umfassen dabei Maßnahmen zur Energieeinsparung sowie zur Nutzung von Abwärme, Kraft-Wärme-Kopplung oder Fernwärme und -kälte. Als erneuerbare Energien zählen solare Strahlungsenergie, gasförmige, flüssige sowie feste Biomasse und Geothermie bzw. Umweltwärme. Auch die prinzipielle Förderbarkeit von solarthermischen Anlagen, Anlagen zur Nutzung von Biomasse, Geothermie und Umweltwärme sowie Wärmenetzen wird erwähnt. Gemeinden werden zudem ermächtigt, den auf Landesebene geregelten Anschluss- und Benutzungszwang für Fernwärme und -kälte auch zum Zwecke des Klima- und Ressourcenschutzes einzusetzen. Eine etwaige Verpflichtung zur Nutzung erneuerbarer Energien in bereits errichteten Wohngebäuden wird explizit den Bundesländern überlassen. Bspw. in Baden-Württemberg wird eine derartige Verpflichtung im bereits 2008 in Kraft getretenen **Erneuerbare-Wärme-Gesetz** formuliert (vgl. EEWärmeG 2007). Insgesamt überschneiden sich die aus EnEV und EEWärmeG resultierenden Verpflichtungen. Eine Zusammenlegung dieser Instrumente wäre daher ggf. sinnvoll bzw. wurde vom Bundesrat (2013) gefordert. Durch die Nutzung erneuerbarer Energien bei Neubauten gemäß EEWärmeG kann bspw. der nicht erneuerbare Jahres-Primärenergiebedarf reduziert werden, der durch die EnEV begrenzt wird.

Neben Variationen bereits im Einsatz befindlicher Instrumente schreiben Matthes u. a. (2013) der **Vereinfachung von Sanierungen im Mietwohnungsmarkt** sowie einer auf der Ökodesignrichtlinie (vgl. Europäisches Parlament 2009) basierenden **EU-Verordnung** die größten Potenziale hinsichtlich der CO₂-Emissionsreduktion bis 2030 zu. Letztere betrifft die Kennzeichnung von Effizienzstandards und **Mindesteffizienzstandards für Heizungssysteme** in Wohngebäuden. Als Vereinfachungen im Mietwohnungsmarkt schlagen sie die Abschaffung der Duldungspflicht der Mieter sowie Mietminderungs- und Heizkostenkürzungsrechte bei Nichterfüllung der Energieeinsparverordnung, die Stärkung der Rolle der energetischen Beschaffenheit bei der Erstellung von Mietspiegeln sowie die Möglichkeit eines „Pauschalzuschlags zur energeti-

schen Verbesserung“ für den Vermieter vor. Letztere soll die Planungssicherheit erhöhen und den Nachweisaufwand von Modernisierungsumlagen reduzieren.

2.3.1.2 Ökonomische Instrumente

Die zentralen finanziellen Förderprogramme auf Bundesebene sind das KfW²⁸-Programm „Energieeffizient Sanieren“ und das Marktanreizprogramm „Erneuerbare Energien“. Diese umfassen bspw. Kredite mit günstigen Konditionen oder Investitionszuschüsse. Über das **KfW-Programm „Energieeffizient Sanieren“**, den Nachfolger des am 31.03.2009 geschlossenen CO₂-Gebäude-sanierungsprogramms, fördert die Kreditanstalt für Wiederaufbau (KfW) z. Zt. Maßnahmen, die einer über den EnEV-Anforderungen liegenden Verbesserung des energetischen Standards dienen (vgl. Kreditanstalt für Wiederaufbau 2013a, 2013b). Dabei sind Gesamtmaßnahmen (KfW-Effizienzhäuser) für Neubau und Bestand sowie Einzelmaßnahmen für den Bestand förderfähig. Bei der Förderung über Kredite mit niedrigen Zinsen reichten die zusätzlich gewährten Tilgungszuschüsse je nach erreichtem energetischen Niveau im Juli 2013 von 2,5% bis 17,5%, Investitionszuschüsse reichten von 10% bis 25%. Im Rahmen des **Marktanreizprogramms „Erneuerbare Energien“** konzentriert das Bundesamt für Wirtschaft und Ausfuhrkontrolle (BAFA) seine Förderangebote auf ausgewählte Technologien zur Nutzung erneuerbarer Energien. Diese sind insbesondere Biomasseanlagen, solarthermische Anlagen und Wärmepumpen (vgl. BAFA 2012a, 2012b, 2012c). Die Förderung erfolgt meist als Investitionszuschuss, der sich aus einer Basisförderung und etwaigen Boni zusammensetzt. Die Basisförderung betrug im Juli 2013 1.400 bis 2.900 € für Biomasseanlagen, 1.500 bis 3.600 € für thermische Solarkollektoranlagen bis 40m² Bruttokollektorfläche, 1.300 bis 2.100 € für Luft-Wasser-Wärmepumpen und 2.800 bis 12.300 € für Sole-Wasser- und Wasser-Wasser-Wärmepumpen.

²⁸ KfW steht für Kreditanstalt für Wiederaufbau.

Neben den Förderprogrammen beeinflusst auch die **Energiesteuer** durch die Erhöhung der Endkundenpreise die Wirtschaftlichkeit energetischer Modernisierungen im Wohngebäudebereich (vgl. EnergieStG 2012; EnergieStV 2012).²⁹ Je höher die Steuer ist, desto größer wird der monetäre Anreiz zur Reduktion des Energieverbrauchs bzw. zur Substitution von Energieträgern durch niedriger besteuerte.

Der **Entwurf eines Gesetzes zur steuerlichen Förderung von energetischen Sanierungsmaßnahmen an Wohngebäuden** sah für Wohngebäudeeigentümer über Änderungen des Einkommensteuergesetzes die steuerliche Absetzbarkeit von energetischen Modernisierungsinvestitionen über 10 Jahre zu jeweils 10% vor (vgl. CDU/CSU & FDP 2011). Hierfür sollten maximaler nicht erneuerbarer Jahres-Primärenergiebedarf und Transmissionswärmeverlust nach der Energieeinsparverordnung um mindestens 15% unterschritten bzw. nicht überschritten werden. Eine derartige steuerliche Absetzbarkeit veränderte insbesondere für selbstnutzende Eigentümer, aber auch für Vermieter die Wirtschaftlichkeit ambitionierter energetischer Modernisierungen. Die Beschlussempfehlung des Ausschusses zur Vermittlung zwischen Bundestag und Bundesrat enthielt die entsprechenden Gesetzesteile allerdings nicht mehr (vgl. Vermittlungsausschuss Bundestag/Bundesrat 2012). Die hessische Landesregierung versuchte jedoch, im Juni 2013 einen nahezu identischen Gesetzesentwurf über den Bundesrat in den Bundestag einzubringen (vgl. Land Hessen 2013).

2.3.1.3 Suasorische Instrumente

Es existiert eine Vielzahl an suasorischen Instrumenten wie Energieberatung vor Ort, Information und Motivation, Weiterbildungs- und Qualitätsoffensiven sowie Energieausweise (vgl. Matthes u. a. 2013). Diese werden in ihrer Gesamtheit als **suasorisches Instrumentenbündel** bezeichnet, das die Gebäudeeei-

²⁹ EnergieStG steht für Energiesteuergesetz und EnergieStV für Energiesteuer-Durchführungsverordnung.

gentümer, -mieter sowie die Dienstleister durch die Bereitstellung von Informationen beeinflusst. In der Folge werden auch die Modernisierungsentscheidungen der Gebäudeeigentümer durch das suasorische Instrumentenbündel beeinflusst.

2.3.2 Umweltpolitische Ziele und internationaler Rahmen

Konkrete umweltpolitische Ziele bzw. Verpflichtungen für die Bundesrepublik Deutschland mit Bezug zur Wärmenutzung in Wohngebäuden sind u. a.:

- **Klimaschutz:** Reduktion der deutschen Treibhausgasemissionen (von allen Sektoren im Ganzen) gegenüber 1990 um 40% bis 2020 und 80% bis 2050 (Bundeskabinett 2010)
- **Luftreinhaltung:** Reduktion der Emissionen (von allen Sektoren im Ganzen) an SO₂, NO_x, VOC und PM bis 2020 gegenüber 2005 um 21%, 39%, 13% und 26% (UNECE 2012)

Im Energiekonzept der Bundesregierung (vgl. Bundeskabinett 2010) wird eine nachhaltige Energieversorgung angestrebt, die über die umweltpolitischen Ziele hinaus auch die wirtschaftspolitischen Ziele **Versorgungssicherheit** und **wirtschaftliche Vertretbarkeit** der Energieversorgung beinhaltet. Den umwelt- und wirtschaftspolitischen Zielen als untergeordnet interpretierbare Hilfsziele sind u. a.:

- Erhöhung des Anteils der erneuerbaren Energien an der Strom- bzw. Wärmeerzeugung auf mindestens 30% bzw. 14% im Jahr 2020 (Bundesregierung 2007)
- Erhöhung des Anteils der erneuerbaren Energien am Bruttoendenergie- bzw. -stromverbrauch auf 18% bzw. 35% bis 2020 und 60% bzw. 80% bis 2050 (Bundeskabinett 2010)
- Reduktion des Primärenergiebedarfs bis 2020 um 20% und 2050 um 50% (Bundeskabinett 2010)
- Erhöhung der Energieeffizienz bis 2020 um 20% (Europäischer Rat 2010)

Die bisher genannten Ziele beziehen sich auf alle Sektoren im Ganzen. Im Energiekonzept der Bundesregierung wird allerdings explizit die Sanierung des Gebäudebestands als zentraler Schlüssel für das Erreichen der Klimaschutzziele und eine moderne Energieversorgung erwähnt. Spezifische Hilfsziele für den Gebäudesektor sind (vgl. Bundeskabinett 2010):

- Verdopplung der energetischen Sanierungsrate von 1% auf 2%
- Reduzierung des Wärmebedarfs³⁰ um 20% bis 2020
- Reduzierung des Primärenergiebedarfs um 80% bis 2050
- Nahezu klimaneutraler Gebäudebestand³¹ bis 2050

Die Reduzierung des Wärmebedarfs lässt sich dabei primär im Bereich der Energieeffizienz verorten und bewirkt eine Reduzierung des Primärenergiebedarfs sowie der Treibhausgasemissionen. Die Ergänzung der Energieeffizienzmaßnahmen durch die Nutzung erneuerbarer Energien ermöglicht zusätzliche Reduzierungen des nicht erneubaren Primärenergiebedarfs und der Treibhausgasemissionen.

Mit der nationalen Nachhaltigkeitsstrategie *Perspektiven für Deutschland* wurden im Jahr 2002 Handlungsfelder, zugehörige Nachhaltigkeitsindikatoren und teilweise auch grobe Ziele definiert (vgl. Bundesregierung 2002). Im Fortschrittsbericht 2012 zur nationalen Nachhaltigkeitsstrategie werden Entwicklungen und Empfehlungen zusammengefasst (vgl. Bundestag – Parlamentarischer Beirat für Nachhaltige Entwicklung 2013). Die Handlungsfelder umfassen *Generationengerechtigkeit, Lebensqualität, sozialen Zusammenhalt* und *internationale Verantwortung*. Die die Wärmenutzung in Wohngebäuden direkt oder indirekt betreffenden umweltpolitischen und wirtschaftspolitischen Ziele können den Handlungsfeldern zugeordnet und somit als Teilbereich der

³⁰ Es ist davon auszugehen, dass es sich um den Nutzenergiebedarf für Raumwärme und Warmwasser handelt.

³¹ Klimaneutralität ist im Energiekonzept der Bundesregierung mit (großem) Interpretationsspielraum definiert: „Klimaneutral heißt, dass die Gebäude nur noch einen sehr geringen Energiebedarf aufweisen und der verbleibende Energiebedarf überwiegend durch erneuerbare Energien gedeckt wird“ (Bundeskabinett 2010).

Nachhaltigkeit interpretiert werden. Als Meilensteine auf dem Weg zur nationalen Nachhaltigkeitsstrategie zählen auf weltweiter Ebene die UNO-Umweltkonferenzen (insbesondere 1992 in Rio de Janeiro) und der Brundlandt-Bericht (vgl. UN 1987), auf europäischer Ebene die Lissabon-Strategie (vgl. Europäischer Rat 2000) und der „Göteborg-Gipfel“ 2001 sowie auf nationaler Ebene das Umweltgutachten 1994 (vgl. Sachverständigenrat für Umweltfragen 1994), die Enquete-Kommissionen des deutschen Bundestages sowie der 2001 berufene Rat für nachhaltige Entwicklung (Spindler o. J.). Die deutsche Nachhaltigkeitsstrategie besitzt zahlreiche inhaltliche Überschneidungen und Abhängigkeiten mit weltweiten, europäischen und nationalen Entwicklungen. In den Bereichen Klimaschutz, Luftreinhaltung und Energieverbrauchsreduktion nehmen dabei auf weltweiter Ebene die Klimarahmenkonvention (vgl. UN 1992) mit dem zugehörigen Kyoto-Protokoll (vgl. UN 1998) bzw. dessen Erweiterung (vgl. UN 2012), auf europäischer Ebene das 1. und 2. Europäische Klimaschutzprogramm, die EU-Gebäuderichtlinie (vgl. Europäisches Parlament 2010), das Genfer Luftreinhaltabkommen (vgl. UNECE 1979) mit den zugehörigen Protokollen (z. B. UNECE 2012) und die Europa-2020-Ziele (vgl. Europäischer Rat 2010) sowie auf nationaler Ebene das integrierte Energie- und Klimaschutzprogramm (vgl. Bundesregierung 2007) sowie das Energiekonzept (vgl. Bundeskabinett 2010) Schlüsselrollen ein.

3. Wohngebäudebestands- und Sanierungsentscheidungsmodelle

Ziel dieses Kapitels ist die Darstellung des Stands der Wissenschaft in Bezug auf die gestellte Hauptforschungsfrage: „Welche Bündel umweltpolitischer Instrumente sind für den Bereich der Wärmenutzung in Wohngebäuden geeignet, um die Treibhausgas- und Luftschadstoffemissionen sowie den Primärenergieverbrauch zu reduzieren?“ Dabei sollen ein geeigneter Modelltyp ausgewählt, Schwächen existierender Ansätze identifiziert und daraus Anforderungen an ein ggf. neu zu entwickelndes Modell abgeleitet werden. Die nicht modellgestützte Beantwortung der Forschungsfrage wird nicht weiter verfolgt, da sich durch die Heterogenität des Wohngebäudebestands in Bezug auf den Bereich Wärmenutzung sowie Wechselwirkungen zwischen den Instrumenten eine hohe Komplexität ergibt. Zur modellgestützten Beantwortung der Forschungsfrage können diverse Modelltypen zum Einsatz kommen, die sich unter dem Begriff *Wohngebäudebestandsmodelle* zusammenfassen lassen.

Abschnitt 3.1 gibt einen Überblick über die unterschiedlichen Typen von Wohngebäudebestandsmodellen. Dabei wird sukzessive die Eignung des Modelltyps des simulierenden, akteurs- bzw. agentenbasierten, auf der Gebäudephysik basierenden *Bottom-Up*-Wohngebäudebestandsmodells für die Beantwortung der Forschungsfrage herausgearbeitet. Anschließend werden existierende Modelle für Deutschland und andere Länder vorgestellt und daraus Forschungslücken abgeleitet.

In Abschnitt 3.2 wird vertiefend auf die Modellierung der Sanierungsentscheidung der Gebäudeeigentümer eingegangen, da diese den Kern des ausgewählten Modelltyps bildet. Dabei wird diese zunächst als Teilgebiet der Diffusionsmodelle verortet, bevor auf Daten und Analysen zur Sanierungsentscheidung für Deutschland eingegangen wird. Anschließend werden Sanierungsentscheidungsmodelle, d. h. Modelle zur Simulation der Sanierungsentscheidung, vorgestellt. Abschließend wird auf Sanierungsentscheidungsmodelle eingegangen,

die bereits in Wohngebäudebestandsmodelle integriert wurden, und darauf aufbauend die zugehörige Forschungslücke aus Abschnitt 3.1 konkretisiert.

In Abschnitt 3.3 wird auf weitere Grundlagen und Abgrenzungen eingegangen, die sich mit dem betrachteten Themenbereich thematisch überschneiden. Dies betrifft insbesondere die Datenlage zum energetischen Zustand von Wohngebäuden sowie das Forschungsfeld der begrenzt rationalen Energienutzung.

In Abschnitt 3.4 werden als Schlussfolgerung aus der Literaturrecherche Anforderungen an ein Modell zur Beantwortung der Forschungsfrage, das auch einen Beitrag zur Schließung der aufgezeigten Forschungslücken leistet, spezifiziert. Abschließend wird begründet, warum eine Neuentwicklung der Anpassung existierender Modelle vorgezogen wird.

3.1 Wohngebäudebestandsmodelle

3.1.1 Überblick über Wohngebäudebestandsmodelle

Wohngebäudebestandsmodelle werden für die Politikberatung herangezogen, um bspw. Energiebedarf und Emissionen sowie entsprechende Minderungspotenziale durch energetische Modernisierung quantifizieren zu können. Grundlegende Arbeiten zum Heizwärmebedarf inklusive Einsparpotenzialen bis 2050 und deren Wirtschaftlichkeit in Deutschland wurden auf Basis einer Wohngebäudetypologie durch das IWU in Darmstadt geleistet (vgl. Ebel u. a. 1990, 1995, 1996; Eicke-Hennig u. a. 1994), wobei die Anlagentechnik nur am Rande berücksichtigt wurde. Die Gebäudetypologie wurde vereinfacht, fortgeschrieben und wie Daten zur Häufigkeitsverteilung der Gebäudetypen veröffentlicht (vgl. IWU 2005, 2007). Kavgic u. a. (2010) und Swan & Ugursal (2009) klassifizieren die zugrundeliegenden Gebäudebestandmodelle in **Top-Down**- und **Bottom-Up**-Ansätze. Während bei **Top-Down**-Modellen ökonomische und technologische Modelle unterschieden werden, können **Bottom-Up**-Modelle in statistische und auf der Bauphysik basierende Modelle eingeteilt werden.

Top-Down-Modelle

Top-Down-Modelle verwenden nach Kavgic u. a. (2010) und Swan & Ugursal (2009) aggregierte Daten des gesamten Gebäude-/Haushaltsbestands wie bspw. makroökonomische Indikatoren, Anzahl von Wohnungen inklusive Neubau- und Abrissraten, klimatische Bedingungen und Diffusionsgrade von Haushaltsgeräten. Somit ist die Kombination von guter Datenverfügbarkeit und der Annahme der Fortschreibbarkeit historischer Daten zugleich Stärke aber auch Schwäche der *Top-Down-Modelle*, da differenziertere Analysen des Wohngebäudebestands den Einsatz von *Bottom-Up-Modellen* erfordern.

Bottom-Up-Modelle

Bottom-Up-Modelle grenzen sich nach Swan & Ugursal (2009) durch eine höhere Granularität, d. h. die Verwendung und Verarbeitung von Informationen, die sich nicht auf den Gebäude-/Haushaltsbestand im Ganzen, sondern auf Teilmengen dieses Bestands beziehen, von den *Top-Down-Modellen* ab. Der Großteil der *Bottom-Up-Modelle* zielt auf technische Potenzialabschätzungen für Energieeffizienzmaßnahmen und den Einsatz erneuerbarer Energien ab (z. B. Kleemann u. a. 2000; Kost 2006; Lowe 2007; Siller u. a. 2007; Sartori u. a. 2008; Heeren u. a. 2009; Wallbaum u. a. 2010), wobei einige Modelle auch Investitionen (z. B. Kirchner & Matthes 2009) und techno-ökonomische Potenziale (z. B. Markewitz & Stein 2003; Amstalden u. a. 2007; Wischermann & Wagner 2011) berücksichtigen. In einigen Arbeiten werden neben den Gebäuden auch Siedlungstypen betrachtet, um insbesondere für Fern- und Nahwärme sowie Wärmeintegration belastbarere Aussagen zu erlangen (z. B. Pfaffenberger u. a. 2001a, 2001b, 2001c, 2004a, 2004b, 2004c). Typische Daten von *Bottom-Up-Modellen* umfassen Wohnungseigenschaften, Klimadaten, Innentemperaturen und Nutzungsprofile (Swan & Ugursal 2009). *Bottom-Up-Modelle* erfordern das Treffen zahlreicher Annahmen, um Datenlücken zu füllen und kleine Stichproben zu verallgemeinern.

Auswahl eines Modelltyps

Aufgrund der Heterogenität des Wohngebäudebestands (vgl. Kapitel 2) und des schwach ausgeprägten Technikbezuges sind *Top-Down*-Modelle nicht für die Beantwortung der Forschungsfrage geeignet. Wegen der Unterschiede hinsichtlich Anlagentechnik und der Energieeffizienz der Gebäudehülle variieren Potenziale zur Minderung von Treibhausgas- und Luftschadstoffemissionen sowie des Primärenergieverbrauchs und deren Wirtschaftlichkeit stark innerhalb des Gebäudebestands und damit auch über die Zeit. Dies führt bei aggregierter Betrachtungsweise zur Nichtfortschreibbarkeit historischer Trends von Emissionen und Energieverbrauch. Auch die Analyse der Wirkung umweltpolitischer Instrumentenbündel, die sich von denen der Vergangenheit unterscheiden, erfordert eine differenziertere Betrachtung des Wohngebäudebestands, als es *Top-Down*-Modelle ermöglichen. Daher wird für die Beantwortung der Forschungsfrage als Modelltyp ein *Bottom-Up*-Modell gewählt. Auf diesen beschränken sich daher auch die folgenden Ausführungen.

3.1.2 *Bottom-Up*-Wohngebäudebestandsmodelle

Statistische *Bottom-Up*-Modelle

Nach Swan & Ugursal (2009) führen statistische *Bottom-Up*-Modelle den Energieverbrauch auf Haushalts- und Wohngebäudeeigenschaften zurück. Dabei kommen Methoden wie Regression, *Conditional Demand Analysis* und Neuronale Netze (vgl. Aydinalp-Koksal & Ugursal 2008) zum Einsatz. Eine Stärke dieser Modelle ist die Verwendung von Energieverbrauchsdaten (im Gegensatz zu Bedarfsdaten), sodass das Nutzerverhalten implizit berücksichtigt wird. Allerdings erfordert der Ansatz eine entsprechende Datengrundlage, die weder für den heterogenen Wohngebäudebestand noch für die Vielfalt potenzieller Sanierungspakete existiert.

Auf der Gebäudephysik basierende *Bottom-Up*-Modelle

Auf der Gebäudephysik basierende *Bottom-Up*-Modelle schätzen den Energieverbrauch basierend auf physikalischen Zusammenhängen über den berechne-

ten Energiebedarf. So wird z. B. der Wärmefluss basierend auf Innenraum- und Außentemperaturen sowie den Wärmedurchgangskoeffizienten der Gebäudehülle berechnet. Somit werden Energieverbrauchsdaten nicht unbedingt benötigt. Der Energieverbrauch kann daher bei diesem Modelltyp prinzipiell für sämtliche potenziellen Maßnahmenpakete geschätzt werden. Bez. des Nutzerverhaltens müssen jedoch Annahmen – bspw. für die Innenraumtemperatur – getroffen werden. Liegen allerdings entsprechende Daten für das Nutzerverhalten vor, bspw. Innenraumtemperaturen in Abhängigkeit von den Haushaltseigenschaften, so können diese als Parameter in die entsprechenden Gleichungen integriert werden (vgl. Swan & Ugursal 2009).

Auswahl eines Modelltyps

Bei auf der Gebäudephysik basierenden Modellen harmonisieren die Datenanforderungen besser mit der Datenlage. Zudem sind physikalische Zusammenhänge bei der „Extrapolation“ auf potenzielle Maßnahmenpakete im Vergleich zu statistischen Modellen belastbarer. Daher wird für die Beantwortung der Forschungsfrage als Modelltyp ein auf der Gebäudephysik basierendes *Bottom-Up*-Modell ausgewählt.

Mundaca u. a. (2010) unterteilen *Bottom-Up*-Modelle zur Bewertung von Energieeffizienzpolitik zudem in optimierende, simulierende und *Accounting*-Modelle.

Optimierende Modelle

Nach Mundaca u. a. (2010) werden bei optimierenden Modellen technische Maßnahmenpakete, d. h. Wärmeerzeuger sowie Maßnahmen an der Gebäudehülle, identifiziert, mit denen die als Zielfunktion formulierten Gesamtausgaben aus Systemsicht minimal sind. Hierbei müssen mehrere Nebenbedingungen erfüllt werden. Diese werden derart formuliert, dass die Wärmeversorgung der Gebäude gewährleistet ist, und bspw. exogen vorgegebene Obergrenzen für Treibhausgas- und Luftschadstoffemissionen sowie den Primärenergieverbrauch eingehalten werden. Prinzipiell können bspw. auch Treibhaus-

gasemissionen als Zielfunktion gewählt und minimiert werden bzw. es können sowohl ökologische als auch ökonomische Kenngrößen in die Zielfunktion einfließen. Nach Genoese (2010) wird als Methode häufig die – ggf. gemischt-zahlige – lineare Programmierung verwendet, da hierzu effiziente Lösungsalgorithmen existieren. Nichtlinearitäten in Zielfunktion und Nebenbedingungen müssen allerdings vernachlässigt oder durch stückweise lineare Funktionen approximiert werden. Die Anwendung von Methoden der nichtlinearen und stochastischen Optimierung bleibt tendenziell auf kleinere Probleme beschränkt.

Simulierende Modelle

Simulierende Modelle zielen nach Mundaca u. a. (2010) auf die Simulation von Entwicklungspfaden des Wohngebäudebestands in Abhängigkeit von vorgegebenen Szenarien, die auch die Spezifikation des umweltpolitischen Instrumentenbündels umfassen, ab. Dabei soll das mikroökonomische Entscheidungsverhalten der Gebäudeeigentümer abgebildet werden. Dieses basiert entweder auf Annahmen oder ist empirisch begründet.

Accounting-Modelle

Bei *Accounting-Modellen* werden nach Mundaca u. a. (2010) im Gegensatz zu simulierenden Modellen die Implementierungsraten für Technologien vom Modellierer exogen vorgegeben. Die Modelle können einerseits zur Analyse der Auswirkungen des Einsatzes bestimmter Technologien bzw. Technologiekombinationen herangezogen werden. Andererseits können die Auswirkungen umweltpolitischer Instrumentenbündel vom Modellierer in Implementierungsraten transformiert werden, um die Auswirkung von umweltpolitischen Instrumentenbündeln abzuschätzen und ggf. zu bewerten.

Auswahl eines Modelltyps

Bei der den optimierenden Modellen inhärenten Entscheidung aus Systemsicht werden individuelle ökonomische oder sonstige Entscheidungskriterien meist nicht berücksichtigt. Mit welchen umweltpolitischen Instrumenten die Umset-

zung der identifizierten Maßnahmenpakete erreicht werden kann, wird bei optimierenden Modellen daher typischerweise nicht direkt beantwortet. Dies könnte zwar ggf. durch die Einbeziehung der Ausgestaltungsparameter umweltpolitischer Instrumente als Entscheidungsvariablen des Optimierungsproblems und die Integration von individuellen Nutzenfunktionen als Nebenbedingungen angegangen werden. Dadurch stiege die Komplexität des Problems allerdings an, sodass die Lösbarkeit kritisch wäre. Zudem können Änderungen an der Struktur der umweltpolitischen Instrumente den Zielfunktionswert verbessern, sodass auch die Funktionsform der Zielfunktion a priori nicht definitiv bekannt ist. Simulierende und *Accounting*-Modelle können dahingegen typischerweise zur Analyse und Bewertung der Auswirkungen vorgegebener umweltpolitischer Instrumente eingesetzt werden. Ein „optimales“ Instrumentenbündel kann mit diesen aber nicht identifiziert werden. Individuelle ökonomische und sonstige Entscheidungskriterien können prinzipiell bei beiden Modelltypen berücksichtigt werden. Bei *Accounting*-Modellen können diese aber nur durch die Annahme entsprechender Implementierungsraten implizit berücksichtigt werden. Die durch umweltpolitische Instrumente initiierte Wirkungskette ist dabei also nicht in das Modell integriert. Bei simulierenden Modellen kann das Entscheiderverhalten und damit die Wirkungskette (einiger) umweltpolitischer Instrumente explizit in die Modellierung einbezogen werden. Daher wird für die Beantwortung der Forschungsfrage als Modelltyp ein simulierendes, auf der Gebäudephysik basierendes *Bottom-Up*-Wohngebäudebestandsmodell ausgewählt. Allerdings ist die Modellierung des Entscheiderverhaltens, ob empirisch begründet oder rein annahmenbasiert, mit großen Unsicherheiten behaftet. Da *Accounting*-Modelle aber weiter verbreitet sind und ihre Abgrenzung aufgrund hybrider Ansätze häufig schwierig ist, werden bei der Diskussion existierender Modelle, insbesondere in den Abschnitten 3.1.4, 3.1.5 und 3.1.6, sowohl simulierende als auch *Accounting*-Modelle aufgeführt.

3.1.3 Simulierende Modelle

Bei simulierenden Modellen können auf Entscheidungsregeln basierende agentenbasierte und auf Differenzen- oder Differentialgleichungssystemen basierende systemdynamische Modelle unterschieden werden (Genoese 2010).

Systemdynamische Modelle

Systemdynamische Modelle gehen auf Forrester (1961) zurück und zielen primär auf die Analyse von Wirkungszusammenhängen innerhalb eines realen Systems unter besonderer Berücksichtigung der Zeit ab (Möst & Fichtner 2009). Die Differenzen- oder Differentialgleichungssysteme werden dabei häufig aus *Causal-Loop*-Diagrammen abgeleitet, die Bestände und Bestandsveränderungen als Grundelemente dynamischer Systeme (und Differentialgleichungen) zueinander in Beziehung setzen. Nach Ilsen (2012) liegt eine Stärke des Ansatzes in der Abbildbarkeit sich verstärkender oder abschwächender Rückkopplungsschleifen und der sich daraus ergebenden Dynamik. Problematisch sind dahingegen das Aufstellen und die Parametrisierung der Gleichungssysteme. Akteursentscheidungen können ebenfalls integriert werden. Im Vergleich zu agentenbasierten Modellen ist der Detaillierungsgrad tendenziell geringer bzw. der Modellierungsaufwand bei gleichem Detaillierungsgrad höher. Es existieren vereinzelt systemdynamische Arbeiten zum Gebäudebestand, die hinsichtlich des Detaillierungsgrades eher den *Top-Down*-Modellen zuzuordnen sind. Groesser & Ulli-Ber (2007) versuchen, mit einem systemdynamischen Ansatz die Diffusion von Energieeffizienzinnovationen im Wohngebäudektor in der Schweiz zu erklären und daraus Politikempfehlungen abzuleiten. Groesser & Bruppacher (2007) analysieren den Entscheidungsprozess der Gebäudeeigentümer von Neubauten hinsichtlich Energieeffizienz mittels eines systemdynamischen Modells. Elias (2008) erstellt ein *Causal-Loop*-Diagramm für Energieeffizienz im neuseeländischen Haushaltssektor. Maalla & Kunsch (2008) simulieren die Diffusion von Mikro-KWK³²-Anlagen in Wohngebäuden

³² KWK steht für Kraft-Wärme-Kopplung.

mittels eines systemdynamischen Modells. Müller (2012) integriert für den Schweizer Gebäudebestand Gebäudeeigentümer, Mieter und Architekten als Akteure in ein systemdynamisches Modell.

Agentenbasierte Modelle

Nach Genoese (2010) steht bei der agentenbasierten Simulation die Integration der Akteursperspektive im Fokus der Modellierung. Akteure werden durch einen oder mehrere Agenten abgebildet, die ggf. (1) lernen, (2) interagieren und (3) sich in ihren Zielsetzungen unterscheiden. Prinzipiell reicht die Definition des Begriffs *Agent* von passiven Objekten ohne kognitive Fähigkeiten bis zu lernenden Objekten mit komplexen Verhaltensmethoden. Eine hohe Granularität kann in agentenbasierten Modellen einfach umgesetzt werden bzw. ist teilweise sogar eine Voraussetzung. Die agentenbasierte Simulation wird in mehreren Gebäude- und Anlagentechnikbestandsmodellen eingesetzt (z. B. Wittmann & Bruckner 2007; Wittmann 2008; Bruckner & Wittmann 2009; Sopha 2011; Zhao 2012; Lee & Yao 2013). Simulierende Wohngebäudebestandsmodelle konzentrieren sich allerdings häufig ausschließlich auf die Gebäudeeigentümer als Akteure – wenn auch in stark aggregierter Form. Von dem Begriff der agentenbasierten Modellierung wird für diese Arbeit in diesem Falle zugunsten des Begriffs der **akteursbasierten Modellierung** Abstand genommen, da aufgrund langer Sanierungszyklen im Wärmebereich nicht von einem Lernprozess ausgegangen wird und zudem die Interaktion zwischen Akteuren bei der Fokussierung auf Eigentümer und Mieter häufig nur von untergeordneter Bedeutung ist³³ bzw. eine Modellierung mit großen Unsicherheiten behaftet wäre.

Auswahl eines Modelltyps

Aufgrund der Heterogenität des Wohngebäudebestands ist eine hohe Granularität erforderlich, um die Luftschadstoff- und Treibhausgasemissionen, den

³³ Bei einer detaillierten Analyse des Sonderfalls selbstnutzender Eigentümergemeinschaften wäre die Interaktion zwischen Eigentümern allerdings relevant.

Primärenergieverbrauch sowie deren Entwicklungen quantifizieren zu können. Daher wird bei der Beantwortung der Forschungsfrage der primäre Fokus auf eine möglichst hohe Granularität gesetzt. Deshalb wird die agenten- bzw. aktorsbasierte Simulation der systemdynamischen Modellierung (im Sinne von Forrester 1961) vorgezogen. Bei starker Differenzierung von Gebäude, Anlagentechnik, Eigentümer und Bewohner werden die *Bestände* ohnehin zu Individuen und die *Bestandsveränderung* zu einer individuellen Entscheidung. Dieser Grenzfall kann derart interpretiert werden, dass die systemdynamische Modellierung in ein agenten- bzw. aktorsbasiertes Modell übergeht.

3.1.4 *Bottom-Up*-Modelle für Deutschland

In diesem Abschnitt werden existierende simulierende und *Accounting-Bottom-Up*-Wohngebäudebestandsmodelle für die Bundesrepublik Deutschland vorgestellt. Sonstige Modelltypen werden nur vereinzelt erwähnt.

IKARUS-Raumwärmemodell

Mit dem IKARUS-Raumwärmemodell (vgl. Markewitz & Stein 2003) werden von Kleemann & Hansen (2005) die Beiträge unterschiedlicher umweltpolitischer Instrumente zu der Entwicklung der CO₂-Emissionen des Wohngebäudebestands in Deutschland analysiert. Dabei werden pauschale Implementierungsraten vordefinierter Pakete von Energieeffizienzmaßnahmen und auf erneuerbaren Energien basierender Anlagentechnik angesetzt, um das Gesamteinsparpotenzial abzuschätzen. Die Wirkungen einzelner umweltpolitischer Instrumente werden auf Basis von in anderen Studien erhobenen Größen (z. B. Langniß u. a. 2010) wie CO₂-Einsparung pro Fördermittel an variierende Fördermittelbudgets angepasst und dadurch abgeschätzt (z. B. Kleemann & Hansen 2005). Dieser Ansatz und das zugrundeliegende IKARUS-Raumwärmemodell wurden für zahlreiche Studien mit Fokus auf der Bundesrepublik Deutschland verwendet (z. B. Cook u. a. 2008; Hansen 2009b, 2010; Matthes u. a. 2009, 2013; Stüber 2009) und bspw. hinsichtlich eines wahr-

scheinlichkeitstheoretischen Ansatzes für Alterungsprozesse erweitert und auf Europa übertragen (vgl. Hansen 2009a).

Invert/EE-Lab

Invert/EE-Lab ist ein *Bottom-Up*-Gebäudebestandsmodell, das sukzessive methodisch weiterentwickelt wurde. Nach Kranzl u. a. (2013) sowie Müller & Biermayr (2011) ist der Kern von *Invert/EE-Lab* ein Entscheidungsalgorithmus, der die Marktanteile von Wärmeversorgungstechnologien basierend auf den Wärmegestehungskosten bestimmt, wobei eine „Trägheit“ sowie die Vorgabe von mittels eines Diffusionsmodells bestimmten Ober- und Untergrenzen für Marktanteile das sofortige Ausscheiden von Technologien mit höheren Wärmegestehungskosten verhindert. Grundlegend hierfür war eine Weiterentwicklung des Modells durch Müller u. a. (2010). Darüber hinaus werden von Kranzl u. a. (2013) bestimmte Wärmeversorgungssystemwechsel ausgeschlossen und durch die Ressourcenverfügbarkeit Grenzen vorgegeben. Für die energetische Sanierung der Gebäudehülle werden von Müller u. a. (2010) und Kranzl u. a. (2013) nur pauschale Sanierungsraten angesetzt. Aktuelle Forschung beschäftigt sich mit der Einbeziehung von Akteurspezifika in den Entscheidungsalgorithmus von *Invert/EE-Lab* (z. B. Kranzl u. a. 2012; Steinbach 2013).

Basis-2

Das dynamische Stoffstrommodell *Basis-2*, eine Weiterentwicklung von *Basis-1*, beinhaltet nach Buchert u. a. (2003) ein Wohngebäudebestandsmodell, das bez. der Veränderung der Energieeffizienz der Gebäudehülle auf Sanierungsraten und bez. der Beheizungsstruktur auf Energieträgeranteile zurückgreift, die über den gesamten Simulationszeitraum exogen vorgegeben werden. In die Bewertung der Entwicklungspfade werden aus ökologischer Sicht neben CO₂-Emissionen und Nutzwärmebedarf auch die Flächeninanspruchnahme, die Inanspruchnahme mineralischer Rohstoffe, der Holzbedarf und der

Bauschuttanfall einbezogen. Wirtschaftliche Gesichtspunkte werden dahingegen vernachlässigt (vgl. Buchert u. a. 2003).

otello

Im vom Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) geförderten Forschungsprojekt otello³⁴ wurde unter Federführung des Instituts für Industriebetriebslehre und Industrielle Produktion (IIP) ein nationales *Integrated-Assessment-Modell* für Deutschland entwickelt, um politischen Entscheidungsträgern ein Werkzeug zur Bewertung umweltpolitischer Instrumente hinsichtlich ökologischer und gesamtwirtschaftlicher Auswirkungen zur Verfügung zu stellen (vgl. Breun u. a. 2012). Betrachtungsgegenstand sind die Emissionen an SO₂, NO_x, PM und CO₂ in den Bereichen Industrie, Energieversorgung, Verkehr und Wohngebäude. Hierbei wurden vom Autor der vorliegenden Arbeit im Wohngebäudebereich die Investitionsentscheidungen über die Sanierung der Wohngebäude aktorsbasiert abgebildet, wobei mehrere Entscheidungstypen unterschieden werden (vgl. Hiete u. a. 2011; Stengel u. a. 2012). Die sanierungsbedingten Änderungen fließen in ein Wohngebäudebestandsmodell, das *Teilmodell Wohngebäude*, ein, auf dessen Basis u. a. Energiebedarf, Emissionen und ökonomische Auswirkungen berechnet werden. Das fast ausschließlich vom Autor der vorliegenden Arbeit im Projekt otello entwickelte *Teilmodell Wohngebäude* wurde im Rahmen dieser Arbeit kontinuierlich weiterentwickelt, modifiziert, hinsichtlich der Datenbasis aktualisiert und auf weitere Fragestellungen angewendet. Dieses Teilmodell entspricht somit einem Zwischenstand der vorliegenden Arbeit, weshalb im Rahmen der vorliegenden Arbeit wesentliche, bereits publizierte Teile abermals aufgeführt werden (vgl. Hiete u. a. 2011; Stengel u. a. 2012).

³⁴ otello steht für Entwicklung eines integrierten, optimierenden Bewertungs- und Allokationsmodells für ein nationales Emissionsmanagement (BMBF-Förderkennzeichen 01UN0603).

Weitere *Bottom-Up*-Modelle für Deutschland

Eine nationale Betrachtung des Wohngebäudebestands in Deutschland mit einer Auflösung bis zur Gemeindeebene wird von Corradini u. a. (2012) vorgenommen. Der Fokus liegt auf dem Raumwärme- und Warmwasserbedarf sowie der Dachflächennutzung durch Solarthermie- und Photovoltaik-Anlagen. Es wird lediglich ein Zeitpunkt betrachtet, und der Zustand der Gebäudehülle sowie weitere Anlagentechnik bleibt unberücksichtigt.

McKenna u. a. (2013) analysieren mit einem aggregierten *Accounting*-Wohngebäudebestandsmodell, ob die energiepolitischen Ziele der Bundesregierung für den Wärmebereich bis 2050 erreicht werden können. Das Modell basiert auf exogen vorgegebenen Sanierungsraten bzw. Implementierungsraten für Maßnahmen und beschränkt sich auf den Endenergiebedarf und die Modernisierung der Gebäudehülle.

Bettgenhäuser (2011) prognostiziert mit dem *Accounting*-Gebäudebestandsmodell *Ecofys Built Environment Analysis Model (BEAM²)* bis zum Jahr 2020 Endenergiebedarf, CO₂-Emissionen, Investitionen und Energiekosten für die Energienutzung in Wohn- und Nichtwohngebäuden. Die Implementierungsraten für Maßnahmen werden dabei exogen vorgegeben und in Szenarien variiert.

3.1.5 *Bottom-Up*-Modelle für andere Länder

In diesem Abschnitt werden existierende, simulierende und *Accounting-Bottom-Up*-Wohngebäudebestandsmodelle für die nationale Ebene vorgestellt, die sich nicht auf die Bundesrepublik Deutschland beziehen. Sonstige Modelltypen werden nur vereinzelt erwähnt.

Frankreich (FR)

Charlier & Risch (2012) betrachten die Entwicklung des Wohnungs- und Haushaltsbestands von Frankreich bis zum Jahr 2050 in Abhängigkeit von umweltpolitischen Instrumenten. Die Haushaltsstruktur- und -entwicklung wird nach fünf Haushaltstypen differenziert, exogen vorgegeben und jeweils zu bestimmten Anteilen einem Wohnungstyp zugeordnet. Für den Wohnungs-

bestand werden insgesamt zwölf Wohnungstypen mit zugehörigem durchschnittlichen Alter, Energiebedarf und CO₂-Emissionen unterschieden. Diese Durchschnittswerte werden durch Sanierungsentscheidungen, die durch Gebäude- und Haushaltscharakteristika wie Einkommen und Verschuldungsrate beeinflusst werden, in Jahresschritten verändert. Ziel der Haushaltsbetrachtung ist die Berücksichtigung finanzieller Hemmnisse bei der Sanierung. Die Entscheidungslogik basiert jedoch ausschließlich auf Annahmen. Allgemein weist das Modell einen niedrigen Differenzierungsgrad auf, wobei die Beurteilung durch eine oberflächliche Beschreibung erschwert wird.

Schweiz (CH)

Kost (2006) sowie Siller u. a. (2007) betrachten in einem Wohngebäudebestandsmodell die Entwicklung von Energiebedarf, CO₂-Emissionen, Investitionen und Energiekosten des Wohngebäudebestands in der Schweiz bis 2050. Dabei werden unterschiedliche Szenarien betrachtet, in denen die Sanierungsraten sowie der Sanierungsstandard der Gebäudehülle exogen vorgegeben werden. Beim Heizsystem werden zudem Substitutionsmatrizen vorgegeben, die den Anteil der Nachfolgeheizsysteme in Abhängigkeit vom Vorgängersystem spezifizieren. Die Bevölkerungsentwicklung wird in dem Modell lediglich herangezogen, um die Nachfrage nach Wohnraum und damit Neubau und Leerstand endogen zu bestimmen. Heeren u. a. (2009) betrachten ebenfalls die Entwicklung des Wohngebäudebestands in der Schweiz bis 2050 unter Vorgabe von bauteilspezifischen Sanierungsraten. Die Entwicklung der Beheizungsstruktur wird exogen vorgegeben. Gebäudehülle und Anlagentechnik werden weitgehend unabhängig voneinander betrachtet.

Großbritannien (UK)

Lee & Yao (2013) identifizierten als Schwäche von Gebäudebestandsmodellen für Großbritannien zur Politikberatung, dass sie die individuelle Investitionsentscheidung nicht adäquat berücksichtigen. Nach einer Diskussion von Markovketten, neuronalen Netzen und agentenbasierter Modellierung als po-

tenziellen Lösungsansätzen wird gefolgert, dass Letzterer am vielversprechendsten ist. Die Notwendigkeit einer starken Differenzierung in Bezug auf Gebäude und Haushalte wird explizit hervorgehoben. In einem einfachen Testmodell wird die prinzipielle Eignung des Ansatzes bestätigt.

In einem aggregierten Modell für Großbritannien zwischen 2000 und 2050 hebt Lowe (2007) die Kohlenstoffintensität der Elektrizitätsversorgung als Determinante für das Treibhausgasminderungspotenzial elektrisch betriebener Wärmepumpen und KWK hervor. Er schlussfolgert zudem, dass beachtliche CO₂-Emissionsreduktionen ohne erhöhte Abrissraten erreicht werden können.

Johnston (2003) untersucht für Großbritannien das technische Reduktionpotenzial für CO₂-Emissionen bis zum Jahr 2050 mittels eines auf der Gebäudephysik basierenden *Accounting*-Wohngebäudebestandsmodells. In drei Szenarien werden dabei jeweils Implementierungsraten von Modernisierungsmaßnahmen exogen vorgegeben.

Firth u. a. (2010) analysieren die Auswirkungen von Unsicherheiten in Modell-eingangsgdaten auf die mittels des Wohngebäudebestandsmodells *Community Domestic Energy Model (CDEM)* geschätzten CO₂-Emissionen über Sensitivitätsanalysen. Sie beziehen sich dabei auf den englischen Wohngebäudebestand und heben hervor, dass die Unsicherheiten in den Ergebnissen beträchtlich sein können.

Norwegen (NO)

Sartori u. a. (2008) führen eine dynamische Materialflussanalyse des norwegischen Gebäudebestands von 1900 bis 2100 durch, um die langfristige Entwicklung von Abriss-, Neubau-, und Renovierungsaktivitäten zu analysieren. Diese Methode lässt sich auf die Analyse von Energieflüssen übertragen.

Sopha (2011; Sopha u. a. 2011) simuliert die Diffusion von Heizungssystemen im norwegischen Wohngebäudebestand mittels eines agentenbasierten Mo-

dells. Die Simulation der Adoptionsentscheidung der Haushalte wurde basierend auf einer Haushaltsbefragung plausibilisiert.

Kanada (CA)

Aydinalp u. a. (2002, 2004) nutzen neuronale Netze, um den Energieverbrauch für Haushaltsgeräte, Beleuchtung und Raumkühlung (vgl. Aydinalp u. a. 2002) sowie Raumwärme und Warmwasserbereitung (vgl. Aydinalp u. a. 2004) in Wohngebäuden zu prognostizieren.

Sadler (2003) integriert die Erkenntnisse von empirisch fundierten Sanierungsentscheidungsmodellen, die er durch Befragungen kanadischer Haushalte gewonnen hat, in ein aggregiertes Wohngebäudebestandsmodell für Kanada. Dabei werden allerdings nur Einfamilienhäuser berücksichtigt.

Weitere *Bottom-Up*-Modelle

Yücel & Pruyt (2011) betrachten in einem aggregierten Wohngebäudebestandsmodell für die Niederlande die Trägheit des Energiebedarfs des Gebäudebestands gegenüber Veränderungen. Dabei werden die Auswirkungen von Änderungen in Neubau-, Abbruch- und Sanierungsraten sowie von Änderungen im Nutzerverhalten auf den Energiebedarf analysiert.

Für die Vereinigten Staaten von Amerika werden im Teilmodul Wohngebäude des *National Energy Modeling System (NEMS)* die Marktanteile von Wärmeerzeugungstechnologien basierend auf Investition, Energiekosten oder Lebenszykluskosten mittels einer log-linearen Funktion geschätzt (vgl. U.S. Energy Information Administration 2010). Charakteristika von Gebäudebewohnern und -eigentümern werden in dem Modell nicht berücksichtigt.

3.1.6 Forschungslücken bei *Bottom-Up*-Modellen

Um, basierend auf den in den vorhergehenden Abschnitten diskutierten simulierenden und *Accounting-Bottom-Up*-Wohngebäudebestandsmodellen für die nationale Ebene, Forschungslücken zu verdeutlichen, werden zentrale Arbeiten in Tabelle 2 zusammenfassend gegenübergestellt.

Tabelle 2: Simulierende und *Accounting-Bottom-Up*-Wohngebäude- bzw. Anlagentechnikbestandsmodelle im Wärmebereich; AT: Österreich; DE: Deutschland; LT: Litauen

Modellcharakteristika		Auf der Gebäudephysik basierende <i>Bottom-Up</i> -Modelle											
X: Trifft auf dieses Modell zu B: Trifft auf dieses Modell bedingt zu * : Diffusionsmodell für wenige Technologien, also kein Bestandsmodell ** : Sämtliche Informationen über den Entscheider werden aus einer Verteilung gezogen, sodass auf Mikroebene keine Informationen über den Entscheider vorliegen *** : Stark aggregiertes Modell mit Durchschnittsbetrachtungen		otello		Invert/EE-Lab		IKA-RUS	Sonstige Modelle						
		Hieta u. a. (2011); Stengel u. a. (2012)	Kranzl u. a. (2012); Steinbach (2013)	Kranzl u. a. (2013)	Müller & Biermayr (2011)	Cook u. a. (2008); Matthes u. a. (2009, 2013)	Buchert u. a. (2003)	Sadler (2003)	Sopha u. a. (2011); Sopha (2011)*	Henkel (2011)**	Charlier & Risch (2012)***	Kost (2006); Siller u. a. (2007)	Heeren u. a. (2009)
Räumliche Systemgrenze		DE	DE	UK, AT, LT	AT	DE	DE	CA	NO	DE	FR	CH	CH
<i>Bottom-Up</i> -Modell	Gebäudehülle	X	X	X	X	X	X	X	-	-	B	X	X
	Anlagentechnik	X	X	X	X	X	X	X	X	X	-	X	X
	Eigentümer/Bewohner	X	-	-	-	-	-	-	X	X	B	-	-
	Modellierung auf Mikroebene	-	-	-	-	-	-	-	-	X	-	-	-
Sanierungsentscheidung	Simulation der Entscheidung	X	X	X	X	-	-	X	X	X	X	-	-
	Kombientscheidung Hülle & Anlagentechnik	X	-	-	-	-	-	-	-	-	X	-	-
Bewertung	Treibhausgase/Energieverbrauch	X	X	X	X	X	X	X	-	X	X	X	X
	Investition/Energiekosten	X	X	-	X	X	-	X	-	X	-	X	-
	Luftschadstoffe	X	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	Verteilung finanzieller Lasten	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Multivariate Ergebnisanalyse zur Defizitbehebung von Instrumenten		-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

Bei den betrachteten Modellen erfolgt – mit Ausnahme der Vorarbeiten des Autors dieser Arbeit – keine integrierte *Bottom-Up*-Modellierung von Gebäudehülle, Anlagentechnik sowie Eigentümern und Bewohnern (inkl. soziodemographischer Charakteristika) auf nationaler Ebene. Daher können Eigentümer und Bewohner weder hinsichtlich der Sanierungsentscheidung und -hemmnisse noch hinsichtlich der Bewertung von Sanierungen hinreichend berücksichtigt werden. Sopha (2011; Sopha u. a. 2011) betrachtet zwar das

reale Investitionsverhalten von Gebäudeeigentümern auf nationaler Ebene im Rahmen eines agentenbasierten Modells. Die Arbeit ist jedoch auf die Anlagentechnik beschränkt. Sadler (2003) koppelt ein hochaggregiertes Einfamilienhausbestandsmodell für Kanada mit den Erkenntnissen von empirisch fundierten Sanierungsentscheidungsmodellen, wobei aber die Verbindung Gebäude-Anlagentechnik-Bewohner/Eigentümer bei der Simulation des Bestands unberücksichtigt bleibt. Wittmann (Wittmann & Bruckner 2007; Wittmann 2008; Bruckner & Wittmann 2009) analysiert die Investitionsentscheidung der Gebäudeeigentümer in Bezug auf die Dämmung der Gebäudehülle und den Ersatz der Anlagentechnik ebenfalls in einem agentenbasierten Modell. Das Modell findet aber nur in einer prototypischen Stadt Anwendung. Somit können in nationalen Wohngebäudebestandsmodellen bisher einkommens-, alters- und lebensphasenbedingte Hemmnisse nicht berücksichtigt werden. Zudem sind finanzielle Überforderungen von selbstnutzenden Eigentümern, Mietern und Vermietern sowie Mitnahmeeffekte nur unzureichend quantifizierbar. Weiterhin können technische und ökonomische Potenziale zur Emissions- und Primärenergieverbrauchsreduktion nicht den Eigentümern und Bewohnern zugeordnet werden, was eine Anpassung umweltpolitischer Instrumente an vielversprechende Zielgruppen ermöglichen würde.

In einer Vielzahl von Modellen basiert die Sanierungsentscheidung in Bezug auf Energieeffizienzverbesserungen und Anlagentechnikwechsel auf exogen vorgegebenen Implementierungsraten. Insbesondere für die Bundesrepublik Deutschland existieren nur zwei Wohngebäudebestandsmodelle mit nationalem Fokus, die ein Modell zur Simulation der Sanierungsentscheidungen verwenden, nämlich Vorarbeiten des Autors zu dem im Rahmen dieser Arbeit entwickelten Modell und *Invert/EE-Lab*. Zudem ist bspw. trotz Relevanz für die Praxis eine gleichzeitige Entscheidung hinsichtlich Gebäudehülle und Anlagentechnik bei *Invert/EE-Lab* bspw. nicht möglich. Eine differenzierte Eigentümerstruktur in Kombination mit Sanierungsentscheidungsmodellen findet

sich in Ansätzen erst in aktuellen Arbeiten (z. B. Hiete u. a. 2011; Stengel u. a. 2012; Kranzl u. a. 2012; Charlier & Risch 2012; Steinbach 2013).

Die Ergebnisse der betrachteten Modelle konzentrieren sich auf Treibhausgasemissionen, Energiebedarf, Investitionen und Energiekosten. Luftschadstoffemissionen sowie die Verteilung finanzieller Lasten werden trotz ihrer Bedeutung für die Beurteilung umweltpolitischer Instrumente aus Nachhaltigkeitsgesichtspunkten mit Ausnahme von (Ansätzen in) Vorarbeiten des Autors nicht berücksichtigt. Räumlich differenzierte Aussagen wurden diesbezüglich ebenfalls noch nicht getroffen.

Bei keinem der betrachteten Modelle mit nationalem Fokus erfolgte die Modellierung auf Mikroebene, d. h. auf der Ebene individueller Gebäude und Haushalte. Stattdessen wurden diese zu möglichst homogenen Klassen zusammengefasst. Dadurch wurden sich durch die Simulation ggf. verstärkende Effekte zuvor eliminiert. Eine multivariate Analyse des Modelloutputs, d. h. von Datensätzen auf Mikroebene, mit dem Ziel einer erweiterten Analyse der simulierten Entwicklungspfade erfolgte demnach nicht. Auch eine hemmnis- und potenzielgetriebene Neu- bzw. Umgestaltung umweltpolitischer Instrumente sowie eine Anpassung von Instrumentenbündeln an unterschiedliche Zielgruppen mittels multivariater statistischer Verfahren wurde bisher nicht auf Basis von Wohngebäudebestandsmodellerngebnissen durchgeführt.

Gemäß Mundaca u. a. (2010) sollte im Bereich der simulierenden *Bottom-Up*-Modelle insbesondere die Einbeziehung nicht-ökonomischer Kriterien in die Modellierung der Entscheidungsfindung der Haushalte, bspw. durch die Integration empirischer Erkenntnisse aus anderen Arbeiten, verbessert werden. Dafür werden auch Ansätze zur Berücksichtigung qualitativer Informationen benötigt. Allerdings gilt es zu berücksichtigen, dass sich das Verhalten der Haushalte mit der Zeit ändert, sodass die Nutzbarkeit empirischer Studien kritisch zu hinterfragen ist. Neben diesen Verbesserungen der Entscheidungslogik werden Methoden zur gezielten und effizienten Ausgestaltung umweltpolitischer Instrumente für den Haushaltsbereich benötigt. Um die Wirkungen

umweltpolitischer Instrumente in ihrer Gesamtheit bewerten und Zielkonflikte berücksichtigen zu können, bietet sich eine Umorientierung von der reinen Kosten-Zielgrößen-Orientierung (bspw. CO₂-Vermeidungskosten) zu einem multikriteriellen Bewertungsrahmen an. Dabei wird insbesondere auch die Einbeziehung der Luftqualität und der finanziellen Überlastung bzw. -entlastung einkommensschwacher Haushalte erwähnt. Als weiteres Forschungsfeld werden verstärkte Unsicherheitsbetrachtungen in Bezug auf Daten und Ergebnisse hervorgehoben. Zudem wird die häufige Intransparenz in Veröffentlichungen zu existierenden Modellen bemängelt.³⁵

Zusammenfassend werden für nationale Simulations-/Accounting-Wohngebäudebestandsmodelle im Allgemeinen und für Deutschland im Speziellen basierend auf den betrachteten Modellen und Mundaca u. a. (2010) folgende Kernschlussfolgerungen abgeleitet:³⁶

- Eigentümer und Bewohner können systemgrenzenbedingt weder hinsichtlich der Sanierungsentscheidung/-hemmnisse noch hinsichtlich der Bewertung (finanzielle Überforderung von selbstnutzenden Eigentümern, Mietern und Vermietern sowie Mitnahmeeffekte) hinreichend berücksichtigt werden.
- Die Beurteilung der Adäquatheit potenzieller Instrumentenbündel konzentriert sich auf Klimaschutz und Wirtschaftlichkeit aus System-sicht und lässt dabei insbesondere Luftschadstoffemissionen sowie deren räumliche Verteilung, Umverteilungswirkungen und finanzielle Überlastungen einkommensschwacher Haushalte außer Acht.

³⁵ Mundaca u. a. (2010) erwähnen noch weitere Forschungslücken, auf die in dieser Arbeit nicht näher eingegangen wird.

³⁶ Alle hier identifizierten Forschungslücken werden im Abschnitt 3.4 bzw. in den Kapiteln 4 oder 5 aufgegriffen und als Modellanforderungen formuliert. Letztere dienen als Ausgangspunkt bei der Entwicklung des aktorsbasierten Wohngebäude- und Haushaltsmodells *AWOHH* in Kapitel 5 sowie der Bewertung und Analyse aus Staatssicht in Kapitel 6.

- Die hemmnis- und potenzialgetriebene Neu- bzw. Umgestaltung umweltpolitischer Instrumente sowie eine Anpassung von Instrumentenbündeln an unterschiedliche Zielgruppen mittels multivariater statistischer Verfahren erfolgt nicht.

Darüber hinaus werden Unsicherheiten in den Daten kaum berücksichtigt, und die Modellbeschreibung ist häufig intransparent.

3.2 Modellierung der Sanierungsentscheidung

Bei simulierenden, auf der Gebäudephysik basierenden *Bottom-Up*-Wohngebäudebestandsmodellen muss der Gebäudeeigentümer aus einer Menge potenzieller Sanierungspakete wählen. Die Simulation dieser Wahlentscheidung erfolgt mittels eines *Sanierungsentscheidungsmodell*³⁷, das somit den Kern dieses Typs von Wohngebäudebestandsmodellen bildet. Dabei können prinzipiell empirische und annahmenbasierte Ansätze unterschieden werden. Sanierungsentscheidungsmodelle stellen u. a. ein Teilgebiet der Diffusionsmodelle dar. Bei der energetischen Sanierung von Wohngebäuden werden unterschiedliche, teils innovative Technologien eingesetzt. Die Entscheidung der Gebäudeeigentümer für eine solche Technologie kann als Adoption und die Ausbreitung im Markt als Diffusion betrachtet werden. Insofern können simulierende Wohngebäudebestandsmodelle auch als Diffusionsmodell interpretiert werden. Daher wird in Abschnitt 3.2.1 zunächst ein Überblick über Diffusionsmodelle gegeben. Anschließend wird in Abschnitt 3.2.2 auf Daten und Analysen zu Sanierungsentscheidungen in Deutschland eingegangen. In Abschnitt 3.2.3 werden Sanierungsentscheidungsmodelle aus der Literatur diskutiert. In Abschnitt 3.2.4 wird speziell auf Sanierungsentscheidungsmodelle eingegangen, die bereits in Wohngebäudebestandsmodelle integriert wurden. Dabei wird abschließend die entsprechende Forschungslücke aus Abschnitt 3.1.6 konkretisiert.

³⁷ In Anlehnung an *technology choice decision approach* (vgl. Mundaca u. a. 2010).

3.2.1 Überblick über Diffusionsmodelle

In der Literatur existieren mehrere Klassifizierungen von Diffusionsmodellen (vgl. Meade 1984; Mahajan & Peterson 1985; Mahajan u. a. 1990, 1993, 2000; Geroski 1999; Meade & Islam 2001, 2006; Usha Rao & Kishore 2010). Usha Rao & Kishore (2010) beschreiben bspw. die Klassifizierungen von Diffusionsmodellen in *fundamentale Diffusionsmodelle*, *flexible Diffusionsmodelle* sowie *Verfeinerungen und Erweiterungen* nach Mahajan & Peterson (1985) sowie in *kumulierende Adoptionsmodelle* und *nicht-lineare Autoregressionsmodelle* nach Meade & Islam (2006). Geroski (1999) trägt vier alternative Erklärungen für den S-Kurvenverlauf bei der Diffusion neuer Technologien zusammen. Als häufigste Vertreter stellt er das mit Informationsmangel begründete *epidemische Modell* und das *Probit-Modell* dar. Als dritte Klasse werden *auf Legitimierung und Wettbewerb* sowie als vierte *auf Informationskaskaden basierende Modelle* unterschieden. Darauf aufbauend unterscheidet Sopha (2011) *epidemische*, *Discrete-Choice*- und *evolutionäre Modelle*. Während ein epidemisches Modell typischerweise durch eine einfache Differenzialgleichung beschrieben werden kann, wird die Wahrscheinlichkeit der Technologiediffusion bei *Discrete-Choice*-Modellen auf Basis der Adoptionsentscheidung der Individuen erklärt. Dabei werden typischerweise *Logit*- oder *Probit*-Modelle³⁸ eingesetzt. Grundgedanke der evolutionären Modelle ist die Heterogenität der Individuen und unvollständige Information. In dieser jüngeren Klasse findet häufig eine akteurs- bzw. agentenbasierte Modellierung statt (Sopha 2011). Empirisch fundierte Sanierungsentscheidungsmodelle können tendenziell als Teilmenge der *Discrete-Choice*-Modelle und annahmenbasierte als Teilmenge der evolutionären Modelle interpretiert werden, wobei eine scharfe Abgrenzung nicht möglich ist. Als Anwendungsfälle für Diffusionsmodelle nennen

³⁸ Mittels *Logit*-Modellen bzw. logistischen Regressionsmodellen kann die Wahrscheinlichkeit der Adoption einer Technologie (abhängige Variable) basierend auf mindestens einer unabhängigen Variablen (Backhaus u. a. 2003) bestimmt werden. Gleiches gilt für *Probit*-Modelle, wobei sich die dem Modell zugrundeliegenden Verteilungsannahmen unterscheiden (Launov 2009).

Usha Rao & Kishore (2010) die Untersuchung der allgemeinen Verbreitung neuer Technologien oder Innovationen und der Preise als Diffusionsvariable sowie die Prognose (bspw. der Nachfrage). Während für die Kostendegression für erneuerbare Energien nutzende Technologien Erfahrungs- und Lernkurvenansätze eingesetzt werden, wird deren Verbreitung mittels Diffusionstheorie und -modellen in Abhängigkeit von Politikeinflüssen sowie sozialen und technischen Faktoren untersucht (Usha Rao & Kishore 2010).

3.2.2 Daten und Analysen zu Sanierungsentscheidungen

Bez. des Investitionsverhaltens von Wohngebäudeeigentümern in Deutschland im Bereich bzw. mit Überlappungen zur Wärmenutzung existieren mehrere Forschungsarbeiten mit Primärdatenerhebungen (z. B. Schätzl u. a. 2007; Jahnke & Brüggemann 2010; Klupp u. a. 2010; Stieß u. a. 2010; Testorf u. a. 2010).

Jahnke & Brüggemann (2010) befragten je 500 Gebäudeeigentümer in Baden-Württemberg und Sachsen zum Thema nachhaltige Wärmeenergienutzung. Dadurch sollten Unterschiede zwischen den Eigentümern in Baden-Württemberg und Sachsen, Einstellungen, Hemmnisse und Anreize in Bezug auf eine nachhaltige Wärmeenergienutzung eruiert werden. Zudem sollten Informationen über den alltäglichen Umgang mit Wärmeenergie gesammelt sowie Lebensstiltypen herausgearbeitet und in Bezug auf ihr Wärmenutzungsverhalten charakterisiert werden.

Von Testorf u. a. (2010) wurden 20.000 Privatpersonen und 1.000 Unternehmen befragt, die von 2006 bis 2009 an einem KfW-Förderprogramm zur energetischen Gebäudesanierung teilgenommen hatten. Dabei sollten Strukturdaten der energetischen Sanierer erhoben werden sowie Hintergründe und Motive zur energetischen Sanierung des Gebäudebestands identifiziert werden.

Bei der energetischen Modernisierung von Eigenheimen ist das Projekt ENEF-HAUS hervorzuheben, in dem das politische Instrumentarium für die energetische Modernisierung von Eigenheimen in Bezug auf Potenziale, Hemmnisse

und Zielgruppen analysiert wurde und Möglichkeiten zur Weiterentwicklung vorgeschlagen wurden (vgl. Weiß & Vogelpohl 2010). Weiterhin wurden Wege zur Verbesserung von Bekanntheit und Transparenz von Energieeffizienzmaßnahmen (vgl. Dunkelberg & Stieß 2011) sowie zur zielgerichteten Motivation von Eigenheimbesitzern (vgl. Albrecht u. a. 2010) aufgezeigt. Auf Basis einer qualitativen Vorstudie (n=44) zu Motiven und Barrieren von Eigenheimbesitzern für eine energieeffiziente Sanierung (vgl. Stieß u. a. 2009) befragten Stieß u. a. (2010) in einer standardisierten Befragung Eigenheimsanierer (n=1.008) über Handlungsmotive und -hemmnisse für eine energetische Gebäudesanierung. Zudem wurde eine weniger detaillierte Bus-Befragung von Eigenheimbesitzern (n=3.000) hinsichtlich des Sanierungsverhaltens als Ergänzung der standardisierten Befragung durchgeführt. Auf Basis der Erhebungen wurde auch analysiert, wie Eigenheimbesitzer energetische Sanierungsmaßnahmen ökonomisch beurteilen (vgl. Albrecht & Zundel 2010) und welche Rolle das Geschlecht im Sanierungsprozess spielt (vgl. van der Land 2010). Neben dem energetischen Ist-Zustand von Ein- und Zweifamilienhäusern, aktuellen Sanierungsraten sowie technischen Einsparpotenzialen wurde auch die Erschließbarkeit der Potenziale betrachtet (vgl. Weiß & Dunkelberg 2010). Es wurden bauliche Hemmnisse, die Wirtschaftlichkeit von Sanierungsmaßnahmen sowie Hemmnisse nach Zielgruppen analysiert.

Schätzl u. a. (2007) untersuchten die Investitionsprozesse im Wohnungsbestand mit Fokus auf den privaten Vermietern. Die energetische Sanierung stellt dabei nur einen Teilbereich dar. Es wurden sowohl Primärdaten erhoben als auch eine intensive Sekundärdatenanalyse durchgeführt.

Klupp u. a. (2010) untersuchten Investitionsprozesse im Wohnungsbestand der 70er und 80er Jahre. Dabei wurde mittels einer Sekundärdatenanalyse und einer Primärdatenerhebung unter Eigentümern und Bewohnern das Investitionsverhalten charakterisiert und auch die Bewohnersicht berücksichtigt. Basierend auf der empirischen Arbeit wurden Bestandsstrategietypen abgeleitet,

die das Investitionsgeschehen differenziert nach Region, Markttyp, Bestandstyp und Eigentümergruppe spezifizieren.

Zudem existieren unterschiedliche Arbeiten mit einem Schwerpunkt auf Akteursanalysen in Hinsicht auf den Wohngebäudesektor. Nach einer Analyse der gesetzlichen Vorgaben und Förderinstrumente im Wärmebereich (vgl. Jahnke 2009b) beschreibt Jahnke (2009a) Rollenverhalten und Beziehungsgeflecht der als „Mesoakteure“ bezeichneten Akteure institutionelle Energieberatung, Bauplaner/Architekten/Ingenieure, Handwerk sowie Wohnungsbaugesellschaften. Zudem wurden die Gebäudeeigentümer und Mieter, mit denen diese Akteure interagieren, charakterisiert sowie deren Anreize und Barrieren aus Sicht der Mesoakteure analysiert. Kröncke u. a. (2011) analysieren die Finanzierungsstrategien wohnungswirtschaftlicher Akteure sowie deren Beeinflussung durch die Finanzkrise.

3.2.3 Sanierungsentscheidungsmodelle

Die Investitionsentscheidung hinsichtlich einer energetischen Verbesserung der Gebäudehülle und/oder eines Austauschs der Anlagentechnik kann mit einem *Sanierungsentscheidungsmodell* simuliert werden. Bei der Entscheidung muss eine Alternative aus einer endlichen Menge sich gegenseitig ausschließender Alternativen ausgewählt werden. Prinzipiell können empirische und – häufiger in Wohngebäudebestandsmodellen zum Einsatz kommende – annahmenbasierte Ansätze unterschieden werden.

Empirische Ansätze

Bei empirischen Ansätzen werden basierend auf tatsächlichen (z. B. Grösche & Vance 2009; Grösche u. a. 2009; Henkel 2011) oder – häufiger – im Rahmen von Experimenten simulierten, fiktiven Investitionsentscheidungen (z. B. Sadler 2003; Banfi u. a. 2008; Kwak u. a. 2010; Achtnicht 2011; Michelsen & Madlener 2012) die Parameter einer aus einem deterministischen und nicht deterministischen Teil bestehenden Nutzenfunktion geschätzt. Meist kommen dabei *Logit*-Modelle bzw. deren Variationen zum Einsatz (Michelsen &

Madlener 2012). Anhand dieser Modelle wird bspw. versucht, Einflussparameter zu identifizieren, die Zahlungsbereitschaft für energetische Sanierungsoptionen abzuschätzen (z. B. Kwak u. a. 2010) oder Mitnahmeeffekte von Förderprogrammen zu quantifizieren (z. B. Grösche & Vance 2009; Grösche u. a. 2009). Tabelle 3 gibt eine Übersicht über ausgewählte *Logit*-Modelle zur Modellierung der Sanierungsentscheidung.

Die in die Nutzenfunktion einfließenden Variablen umfassen dabei meist binäre Variablen, die die ausgewählte Alternative spezifizieren. Darüber hinaus können technische Charakteristika von Gebäude und Anlagentechnik, soziodemographische Informationen des Eigentümers, regionale Informationen, ökonomische und ökologische Kenngrößen sowie Bedeutungszumessungen für derartige Kenngrößen als Variablen in die Nutzenfunktion eingehen. Von den acht betrachteten Arbeiten gehen nur bei fünf Arbeiten Informationen über Eigentümer oder Bewohner als Variable in die Zielfunktion ein (vgl. Grösche & Vance 2009; Grösche u. a. 2009; Achtnicht 2011; Henkel 2011; Michelsen & Madlener 2012). Von diesen beschränken sich zwei Arbeiten auf den Austausch der Anlagentechnik (vgl. Henkel 2011; Michelsen & Madlener 2012). Die verbleibenden Arbeiten, die sich nur auf selbstnutzende Eigentümer beziehen, ermöglichen prinzipiell die Simulation von Sanierungsentscheidungen unter Berücksichtigung von Informationen über die Gebäudeeigentümer. Allerdings beschränken sich diese Informationen bei Grösche & Vance (2009) sowie Grösche u. a. (2009) auf das Einkommen. Achtnicht (2011) berücksichtigt darüber hinaus auch Alter und Schulabschluss als Modelleingangsgrößen, allerdings werden Maßnahmen an der Gebäudehülle nicht differenziert und Kombimaßnahmen an Gebäudehülle und Anlagentechnik nicht berücksichtigt.

Insgesamt beschränken sich die betrachteten Ansätze auf selbstnutzende Eigentümer. Zudem decken sie nur einen Teil der potenziellen Maßnahmenpakete ab. Mit Ausnahme der Arbeit von Sadler (2003) wurden diese Ansätze nicht in Wohngebäudebestandsmodellen eingesetzt.

Tabelle 3: *Logit*-Modelle zur Simulation der Investitionsentscheidung von Selbstnutzern;
 *: metrische Variable, **: 5-Punkt-Likert-Skala; SP: *Stated preference data*; RP: *Revealed preference data*

Quelle	Erhebungsart (Fallzahl)	Wahlmöglichkeiten	In die Nutzenfunktion eingehende unabhängige Variablen, ggf. mit Überkategorien (Variablen sind binär, andernfalls gekennzeichnet)
Sadler (2003)	SP (n=698 x 4)	5 Anlagentechnikvarianten	Investition*, Betriebskosten*, Ansprechzeiten*, Zuschüsse*, Anlagentechnikvariante 1, ... 5 (vgl. links)
	SP (n=698 x 2)	Hüllenvarianten mit und ohne Energieeffizienzverbesserung	Investition*, Betriebskosten*, Komfortlevel, Zuschüsse*, Hüllenvariante 1, Hüllenvariante 2 (vgl. links)
Banfi u. a. (2008)	SP (n=3.613)	Status Quo und 1 Paket	4 x Fenstervariante, 4 x Fassadenvariante, 2 x Lüftungsart, Preis*
Grösche & Vance (2009)	RP (n=2.530)	16 Alternativen: Keine energetische Sanierung, Dach (D),	Einkommen*, Energieeinsparung*, Energieverbrauch*, Ostdeutschland, Informationszugriff*, Investition*, Alternative 1, ... 16 (vgl. links)
Grösche u. a. (2009)	RP (n=2.128)	Fenster (F), Wand (W), Anlagentechnik (A), DF, DW, DA, FW, FA, WA, DFW, DFA, DWA, FWA, DFWA	
Kwak u. a. (2010)	SP (n=509)	Status-Quo und 2 Pakete	3 x Fenstervariante, 3 x Fassadenvariante, 2 x Lüftungsart, Preis*
Achtnicht (2011)	SP (n=379 x 12)	Wahl zwischen Anlagentechnikwechsel und Gebäudehüllenmaßnahme, danach Wahl zwischen präferierter Alternative und aktueller Situation	Amortisationszeit*, Anlagentechnikneubau nach 2000, CO ₂ -Einsparung*, Empfehlung von Energieberater, Energieeinsparpotenzial*, Energiepreisanstiegserwartung, Förderung, Garantiejahre*, hat Pelletkessel, hoher Bildungsabschluss, Ostdeutschland, Anlagentechnikwechsel, Dämmung, Investition abzüglich Zuschuss*, Isolierung schon ok, Eigentümer jünger als 46 Jahre
Henkel (2011)	RP und berechnete Daten (n=233)	8 Anlagentechnikvarianten: Gas, Gas/Solarthermie, Öl, Öl/Solarthermie, Wärmepumpe, Wärmepumpe/solar, Pelletkessel, Pelletkessel/solar	<p>Anlagentechnikeigenschaften*: Investition, Betriebskosten, Annuität, Investition pro Haushaltseinkommen</p> <p>Gebäude/Technik: Neubau, Wandheizung, Öl vorher, Gas vorher, Sonstiges vorher, Kesselbaujahr vorher*, Gebäudebaujahr*, Doppelhaushälfte/Reihenhaus, Einfamilienhaus, Mehrfamilienhaus, Haushaltsgröße*, Kinder im Haushalt*, <5.000 Einwohner, 5.000-20.000 Einwohner, 20.000-100.000 Einwohner, 100.000-500.000 Einwohner</p> <p>Bedeutung: Investition**, Betriebskosten**, Umweltfreundlichkeit**, erneuerbare Energie**, Platzbedarf**, Technikreife**, Instandhaltungsaufwand**, Vorreiter sein**, Förderung**, Unabhängigkeit**, Energietechnikinteresse (3-Punkt-Skala), Förderinstrumente (4-Punkt-Skala)</p> <p>Alternative: Anlagentechnikvariante 1, ... 8 (vgl. links)</p>
Michelsen & Madlener (2012)	SP und RP (n=2.240)	4 Anlagentechnikvarianten: Gas/Solarthermie, Öl/Solarthermie, Wärmepumpe, Pelletkessel	<p>Soziodemographisch: 5 x Einkommen, Alter*, Universitätsabschluss, weiblich</p> <p>Gebäude/Technik: 5 x Größe, Alter*, Einfamilienhaus, Energieträgereinschränkung, Beratung, Gas vorher, Öl vorher, Sonstiges vorher, saniert, Niedrigenergie</p> <p>Räumlich: Ländlich, Ostdeutschland, Süddeutschland</p> <p>Bedeutung: Förderung**</p> <p>Berücksichtigung: Investition, Instandhaltungskosten, Energiekosten, Gesamtkosten</p> <p>Präferenzen: Energieeinsparung**, Unabhängigkeit**, Umweltschutz**, Komfort**, Image**</p> <p>Alternative: Anlagentechnikvariante 1, ... 4 (vgl. links)</p>

Annahmenbasierte Ansätze

Die annahmenbasierten Ansätze greifen teilweise auf definierte Entscheidertypen und -strategien zurück (z. B. Bruckner & Wittmann 2009; Hiete u. a. 2011; Sopha u. a. 2011; Stengel u. a. 2012; Zhao 2012). Dabei wird versucht, als typisch angenommenes Investitionsverhalten nachzubilden und basierend auf diesen Annahmen bspw. die Beeinflussung des Investitionsverhaltens durch umweltpolitische Instrumente zu identifizieren. Aufgrund der fehlenden empirischen Basis kommt bei diesem Ansatz der Analyse von Sensitivitäten eine besondere Bedeutung zu. Der Fokus liegt bei den annahmenbasierten Ansätzen häufig auf Gebäude- und Anlagentechnikbeständen, für die empirische Ansätze aufgrund der Datenlage nicht angewendet werden können.

Zhao (2012) unterscheidet in Bezug auf Gewerbe-, Handels- und Dienstleistungsgebäude die sieben Entscheiderstrategien (1) keine Sanierung, (2) Zufallsauswahl, (3) Wahl einer vordefinierten Maßnahmenkombination, (4) Durchführung aller Maßnahmen, (5) Auswahl der Maßnahmenkombination gemäß Wirtschaftlichkeit, (6) mit höchster Energieeinsparung sowie (7) Kompromiss zwischen Wirtschaftlichkeit und Energieeinsparung. Hiete u. a. (2011) sowie Stengel u. a. (2012) unterscheiden für den Wohngebäudebestand in Deutschland bei selbstnutzenden Eigentümern die fünf Entscheidertypen (1) Ausbesserer, (2) Mindestmaßsanierer, (3) Ökonom mit hohem Zinssatz, (4) Ökonom mit niedrigem Zinssatz und (5) Ökomodernisierer. Bei den Vermietern werden die Bewirtschaftungsstrategien (1) Abbruchstrategie, (2) Substanzerhaltungsstrategie, (3) Wertvermehrungsstrategie mit hohem und (4) niedrigem Kalkulationszinssatz sowie (5) Ökomodernisierungsstrategie differenziert. Bruckner & Wittmann (2009) unterscheiden bei selbstnutzenden Eigentümern von Wohngebäuden die Entscheidertypen (1) Traditionelle mit geringer Rationalität, (2) Traditionelle mit mittlerer Rationalität, (3) Technologieführer mit mittlerer Rationalität, (4) Technologieführer mit hoher Rationalität und (5) Etablierte mit mittlerer Rationalität. Bei Vermietern unterscheiden sie (1) private Vermieter sowie (2) institutionelle Vermieter. Sopha

u. a. (2011) unterscheiden für die Erneuerung von Heizsystemen in Norwegen die vier Entscheiderstrategien (1) gleiches Heizsystem wie zuvor, (2) effizientestes Heizsystem, (3) Heizsystem mit höchstem Anteil unter relevanten Kontakten und (4) Effizienteres der Heizsysteme nach Strategie (1) und (3). Stieß u. a. (2010) unterscheiden – basierend auf empirischen Untersuchungen – die fünf Zielgruppen für die energetische Eigenheimmodernisierung (1) überzeugte Energiesparer, (2) aufgeschlossene Skeptiker, (3) unreflektierte Instandhalter, (4) desinteressiert Unwillige und (5) engagierte Wohnwertoptimierer. Diese Erkenntnisse werden jedoch nicht in ein Wohngebäudebestandsmodell integriert. Zhang u. a. (2012) definieren acht Archetypen für private Energieverbraucher – nicht in Bezug auf das Investitionsverhalten – im Haushaltsbereich, die sich hinsichtlich der Energieeffizienz des Gebäudes bzw. der Geräte, der Umweltfreundlichkeit ihrer Einstellung und der Aufenthaltszeiten im Gebäude unterscheiden. Ziel ist hierbei die Unterstützung beim Entwurf lokaler Politikschemas. Lützkendorf (2012) unterscheidet Entscheidungsmuster in Bezug auf die energetische Modernisierung vor dem Hintergrund der Lebenszyklusphase der Eigentümer. Beim Erwerb eines Gebäudes durch einen neuen selbstnutzenden Eigentümer kann eine energetische Modernisierung an eine ggf. ohnehin durchzuführende Instandsetzung oder einen Umbau gekoppelt sein („Jetzt oder nie“). Auch ein Ersatzneubau ist als Sonderfall der Modernisierung denkbar („Jetzt aber richtig“). Während der Gebäudenutzungsphase können vom selben Eigentümer energetische Modernisierungen im Zusammenhang mit der laufenden Instandsetzung als Stufenplan „Schritt für Schritt“ gemäß einem Langzeitkonzept mit abgestimmten Maßnahmen umgesetzt werden. Zudem kann „Jahr für Jahr“ das Nutzerverhalten durch Auswertungen des Energieverbrauchs verbessert und die Anlagentechnik mit geringinvestiven Maßnahmen optimiert werden.

Des Weiteren existieren konzeptionelle annahmenbasierte Ansätze, die das Beziehungsgeflecht zwischen Akteuren sowie Anlässe und Situationen als Aus-

gangspunkt für Entscheidungen der Akteure in den Mittelpunkt der Betrachtung stellen (z. B. Lützkendorf u. a. 2008; Fath & Stengel 2012).

Schlussfolgerungen

Empirische und annahmenbasierte Sanierungsentscheidungsmodelle müssen – sofern sie nicht neu entwickelt werden – an den jeweiligen Analyseschwerpunkt angepasst werden, was bei den annahmenbasierten Ansätzen leichter möglich ist. Prinzipielle Aussagen zu den Vor- und Nachteilen einzelner Ansätze weisen daher allerdings hohe Unsicherheiten auf. Für die Integration der annahmenbasierten und der empirischen Ansätze in ein Gebäudebestandsmodell (vgl. Abschnitt 3.2.4) muss dieses die notwendigen Informationen bereitstellen. Ein Vorteil der empirischen Ansätze ist die Fundierung mittels realer Daten. Existierende Arbeiten beschränken sich allerdings fast ausschließlich auf den Bereich selbstnutzender Eigentümer bzw. der Eigenheimbesitzer, so dass diese in einem Wohngebäudebestandsmodell für Deutschland um annahmenbasierte Ansätze für vermietete Gebäude bzw. Mehrfamilienhäuser erweitert werden müssten. Die annahmenbasierten Ansätze sind dahingegen für den gesamten Wohngebäudebestand einsetzbar und flexibler als die empirischen Ansätze.

3.2.4 In Gebäudebestandsmodelle integrierte Sanierungsentscheidungsmodelle

Es existieren mehrere Arbeiten, bei denen Sanierungsentscheidungsmodelle in Gebäude- oder Anlagentechnikbestandsmodelle integriert wurden (z. B. Sadler 2003; Wittmann & Bruckner 2007; Wittmann 2008; Bruckner & Wittmann 2009; Henkel 2011; Hiete u. a. 2011; Müller & Biermayr 2011; Sopha 2011; Sopha u. a. 2011; Charlier & Risch 2012; Kranzl u. a. 2012; Stengel u. a. 2012; Zhao 2012; Kranzl u. a. 2013; Steinbach 2013).

Empirische Ansätze

Empirisch fundierte Sanierungsentscheidungsmodelle werden dabei überwiegend für den Anlagentechnikbestand eingesetzt (z. B. Henkel 2011; Sopha

2011; Sopha u. a. 2011). Der Einsatz empirischer Ansätze in Gebäudebestandsmodellen beschränkt sich auf die Arbeit von Sadler (2003). Dieser koppelt die auf ca. 700 ausgefüllten Fragebögen basierenden Ergebnisse zweier *Logit*-Modelle mit einem groben Gebäudebestandsmodell für Einfamilienhäuser in Kanada, um politische Entscheidungsträger hinsichtlich des adäquaten Einsatzes umweltpolitischer Instrumente zu unterstützen. Die Abbildung der technischen Charakteristika des Bestands ist allerdings äußerst grob – sie umfasst zwei Baualtersklassen und zwei Sanierungszustände. Die Investitionsentscheidung hinsichtlich Anlagentechnik und Gebäudehülle wird nicht integriert betrachtet. Zudem bleibt der Zusammenhang zwischen Gebäudehülle, Anlagentechnik und Eigentümer bei der Sanierungsentscheidung unberücksichtigt, sodass weder Eigentümercharakteristika noch die Anlagentechnik vor der Sanierung die Sanierungsentscheidung beeinflussen können.

Annahmenbasierte Ansätze

Annahmenbasierte Ansätze werden häufiger in Gebäudebestandsmodellen eingesetzt. Zhao (2012) setzt diese für Gewerbe-, Handels- und Dienstleistungsgebäude in einem agentenbasierten Modell ein. Wittmann & Bruckner (2007), Wittmann (2008) sowie Bruckner & Wittmann (2009) simulieren die Entwicklung des Gebäudebestands einer prototypischen deutschen Stadt mittels agentenbasierter Simulation. Charlier & Risch (2012) betrachten die Entwicklung des Wohngebäudebestands in Frankreich und setzen dafür ein Sanierungsentscheidungsmodell unter besonderer Berücksichtigung finanzieller Hemmnisse ein. Für den Wohngebäudebestand in Deutschland werden das Modell *INVERT/EE-Lab* (vgl. Abschnitt 3.1.4; Müller u. a. 2010; Müller & Biermayr 2011; Kranzl u. a. 2012; Kranzl u. a. 2013; Steinbach 2013) sowie das im Rahmen der vorliegenden Arbeit entwickelte Modell (vgl. Abschnitt 3.1.4; Hiete u. a. 2011; Stengel u. a. 2012) eingesetzt. Eine Differenzierung der Eigentümerstruktur erfolgte dabei nur bei vier dieser Arbeiten (vgl. Hiete u. a. 2011; Kranzl u. a. 2012; Stengel u. a. 2012; Steinbach 2013). Sozio-demographische Informationen über Eigentümer und Mieter, als Indikator für finanzielle und

altersbedingte Hemmnisse, aber auch als Voraussetzung für die Bewertung der Entwicklung, wurden bisher nur von Hiete u. a. (2011) sowie Stengel u. a. (2012) in die Wohngebäudebestandsmodellierung in Deutschland einbezogen.

Forschungslücke

Forschungslücken bestehen demnach in der Integration empirischer Ansätze bzw. Befunde in die techno-ökonomisch orientierten Gebäudebestandsmodelle, um die Potenzialerschließung über einzelne Instrumente besser abschätzen zu können. Um der gesamten Variantenvielfalt eines techno-ökonomischen Gebäudebestandsmodells unter gleichzeitiger Berücksichtigung der Entscheidungscharakteristika gerecht zu werden, wäre allerdings eine nicht vertretbare Fallzahl bei den Befragungen vonnöten. Da selbst eine hohe Fallzahl zu nicht belastbaren Ergebnissen führen kann, wäre ggf. ein kombinierter empirischer und annahmenbasierter Ansatz vielversprechend. Weitere Forschungslücken beziehen sich auf die Einbeziehung sozio-demographischer Informationen in die Gebäudebestandsmodellierung, sodass diese in annahmenbasierten Sanierungsentscheidungsmodellen als Indikator für Sanierungshemmnisse, aber auch für die Bewertung von Entwicklungen, herangezogen werden können.

Alle hier und in Abschnitt 3.1.6 identifizierten Forschungslücken werden im Abschnitt 3.4 bzw. in den Kapiteln 4 oder 5 aufgegriffen und als Modellanforderungen formuliert. Letztere dienen als Ausgangspunkt bei der Entwicklung des aktorsbasierten Wohngebäude- und Haushaltsmodells *AWOHM* in Kapitel 5 sowie der Bewertung und Analyse aus Staatssicht in Kapitel 6.

3.3 Sonstige Grundlagen und Abgrenzungen

3.3.1 Datenlage zur Energienutzung in Wohngebäuden

Swan & Ugursal (2009) erklären die schlechte Datenverfügbarkeit für den Wohngebäudesektor im Vergleich zu anderen Sektoren mit der Einzigartigkeit der Gebäude, datenschutzrechtlichen Gründen, dem starken Einfluss des Nutzerverhaltens und den relativ hohen Kosten detaillierter Messungen. Typische Datenquellen umfassen Befragungen, individuelle Rechnungsdaten (bzw. be-

reits anonymisierte Daten der Energieabrechnungsdienste), detaillierte Messungen und Energiebedarfsschätzungen des gesamten Sektors. Daten zu einer Wohngebäudetypologie in Bezug auf die Wärmenutzung in Deutschland sowie Daten zur Häufigkeitsverteilung der Gebäudetypen wurden veröffentlicht und fortgeschrieben (vgl. IWU 2005, 2007). Diefenbach u. a. (2007) analysierten die Datenlage in Bezug auf den energetischen Zustand von Wohngebäuden in Deutschland. Die aufgezeigten Datenlücken wurden teilweise von Diefenbach u. a. (2010) durch eine Umfrage (n=ca. 7.500) zu aktuellem Zustand und Modernisierungstrends im Bereich Wärmeschutz, Heizung und Gebäudetechnik geschlossen. Walberg u. a. (2011) untersuchten den technischen Zustand und die Modernisierungsfähigkeit von Wohngebäuden mit 1 bis 12 Wohneinheiten und ermittelten die Anzahl an Gebäuden, die kaum modernisierbar sind. Daten zu Kombinationen von Eigentümern bzw. Bewohnern, Gebäude und Anlagentechnik lassen sich aus dem *Scientific-Use-File* (SUF) des Mikrozensus³⁹ (n=ca. 227.000 Haushalte in Wohngebäuden) (vgl. Statistisches Bundesamt 2008c) ableiten. Der Datensatz ermöglicht differenzierte Analysen des Wohngebäudebestands, der Haushalte, der Wohnsituation der Haushalte und der Wärmeversorgung, differenziert nach Baualtersklassen. Diese Datenquelle könnte somit als Basis für eine aktorsbasierte Modellierung von Kombinationen von Eigentümern bzw. Bewohnern, Gebäude und Anlagentechnik herangezogen werden. Daneben existieren zahlreiche weitere Datenquellen, die für eine aktorsbasierte Modellierung des Wohngebäudebestands genutzt werden können (z. B. Heinze GmbH 2005; Bundesinstitut für Bau-, Stadt und Raumforschung 2006; Staatliche Vermögens- und Hochbauverwaltung Baden-Württemberg 2006; Statistisches Bundesamt 2008b; Struschka u. a. 2008; BKI 2010; co2online gGmbH 2010)⁴⁰.

³⁹ Bei dem SUF des Mikrozensus handelt es sich um eine Substichprobe von 70% des Mikrozensus. Das SUF repräsentiert damit 0,7% der Haushalte in Deutschland.

⁴⁰ BKI steht für Baukosteninformationszentrum Deutscher Architektenkammern GmbH.

3.3.2 Abgrenzung zur begrenzt rationalen Energienutzung

Lopes u. a. (2012) unterscheiden in einem *Review-Paper* zu Modellen der Energienutzung in Wohngebäuden drei grobe Ansatzrichtungen: (1) *Energy behaviour frameworks*, (2) Energiemodelle und (3) *Energy behaviours modelling*. *Energy behaviour frameworks* werden von Wilson & Dowlatabadi (2007) weiter differenziert in (A) nutzenbasierte Entscheidungsmodelle und Verhaltensökonomik, (B) Technologieadoption und einstellungsbasierte Entscheidungsmodelle, (C) Entscheidungsmodelle in der Sozial- und Umweltpsychologie sowie (D) *social construction of decision making*. (A), (B) und (C) gehen im Gegensatz zu dem soziologischen Ansatz (D) von individuellen Entscheidungen aus. Energiemodelle umfassen überwiegend technische und ökonomische Ansätze zur Abbildung der Energienutzung und deren Entwicklung. Hierunter fallen insbesondere auch optimierende und *Accounting*-Gebäudebestandsmodelle (vgl. Abschnitt 3.1). **(3) *Energy behaviours modelling*** entspricht hybriden Modellen mit Eigenschaften von (1) und (2). In diesem interdisziplinären Bereich wird von Lopes u. a. (2012) weiterer Forschungsbedarf identifiziert. Simulierende *Bottom-Up*-Wohngebäudebestandsmodelle können diesem Bereich zugeordnet werden.

3.4 Schlussfolgerungen

Primärer Betrachtungsgegenstand dieser Arbeit ist der Bereich der Wärmenutzung im Wohngebäudebestand in Deutschland. Zur Beantwortung der Hauptforschungsfrage „Welche Bündel umweltpolitischer Instrumente sind für den Bereich der Wärmenutzung in Wohngebäuden geeignet, um die Treibhausgas- und Luftschadstoffemissionen sowie den Primärenergieverbrauch zu reduzieren?“ wurde in Abschnitt 3.1 argumentativ als Modelltyp ein simulierendes, auf der Gebäudephysik basierendes *Bottom-Up*-Wohngebäudebestandsmodell ausgewählt. Für diesen Modelltyp und die auch als deren Teilmenge interpretierbaren *Accounting*-Modelle wurden in Abschnitt 3.1.6 folgende zentrale Forschungslücken identifiziert:

- Eigentümer und Bewohner können systemgrenzenbedingt weder hinsichtlich der Sanierungsentscheidung/-hemmnisse noch hinsichtlich der Bewertung (finanzielle Überforderung von selbstnutzenden Eigentümern, Mietern und Vermietern sowie Mitnahmeeffekte) hinreichend berücksichtigt werden.
- Die Beurteilung der Adäquatheit potenzieller Instrumentenbündel konzentriert sich auf Klimaschutz und Wirtschaftlichkeit aus System-sicht und lässt dabei insbesondere Luftschadstoffemissionen sowie deren räumliche Verteilung, Umverteilungswirkungen und finanzielle Überlastungen einkommensschwacher Haushalte außer Acht.
- Die hemmnis- und potenzialgetriebene Neu- bzw. Umgestaltung umweltpolitischer Instrumente sowie eine Anpassung von Instrumentenbündeln an unterschiedliche Zielgruppen mittels multivariater statistischer Verfahren erfolgt nicht.

Darüber hinaus werden Unsicherheiten in den Daten kaum berücksichtigt, und die Modellbeschreibung ist häufig intransparent.

In Abschnitt 3.2 wurde aufgezeigt, dass empirische Arbeiten und statistische Daten zu Sanierungsentscheidungen und -hemmnissen existieren, deren Erkenntnisse bisher zumeist nicht direkt in Wohngebäudebestandsmodelle einfließen. Abschnitt 3.3 verdeutlicht, dass trotz zahlreicher Datenlücken für den Wohngebäudebestand mit dem *Scientific-Use-File* des Mikrozensus 2006 (Statistisches Bundesamt 2008c) auf Mikroebene (d. h. auf der Ebene konkreter Haushalte und Gebäude) Daten existieren, die eine verstärkte Berücksichtigung des Zusammenhangs von Eigentümer, Bewohner, Gebäude und Anlagentechnik in Wohngebäudebestandsmodellen für Deutschland ermöglichen.

Zur Schließung der aufgezeigten Forschungslücken werden unter Berücksichtigung der Datenlage folgende Kernanforderungen an ein simulierendes, auf

der Gebäudephysik basierendes *Bottom-Up*-Wohngebäudebestandsmodell zur Beantwortung der Hauptforschungsfrage⁴¹ gestellt:

- Durch die integrierte Modellierung von Wohngebäuden (Gebäudehülle und Anlagentechnik) sowie der Akteure Eigentümer und Bewohner soll einerseits die Abbildung von Sanierungshemmnissen verbessert und andererseits die finanzielle Überforderung von selbstnutzenden Eigentümern, Mietern und Vermietern sowie Mitnahmeeffekte quantifizierbar gemacht werden.
- Die Beurteilung der Adäquatheit potenzieller Instrumentenbündel soll sich an der deutschen Nachhaltigkeitsstrategie orientieren, um zukünftig eine Entscheidungsunterstützung im Bereich der Nachhaltigkeits- und Energiepolitik zu ermöglichen. Dabei sollen insbesondere Luftschadstoffemissionen sowie deren räumliche Verteilung, Umverteilungswirkungen und finanzielle Überlastungen einkommensschwacher Haushalte in die Betrachtung einbezogen werden.
- Durch die Modellierung der Entwicklungspfade des Wohngebäude- und Haushaltsbestands auf Mikroebene – d. h. auf der Ebene einzelner Gebäude und Haushalte – soll eine hemmnis- und potenzialgetriebene Neu- bzw. Umgestaltung umweltpolitischer Instrumente sowie eine Anpassung von Instrumentenbündeln an unterschiedliche Zielgruppen mittels multivariater statistischer Verfahren ermöglicht werden.

Als weitere Anforderungen sollen Unsicherheiten in den Daten explizit berücksichtigt werden und die Modellbeschreibung möglichst transparent sein. Die Modellierung der die Sanierungsentscheidung treffenden Eigentümer soll akteursbasiert⁴² erfolgen, und die Wirkung umweltpolitischer Instrumente

⁴¹ In Kapitel 1 wurden zur Konkretisierung der Hauptforschungsfrage in Anbetracht der Forschungslücken und der Modellanforderungen Teilfragen formuliert.

⁴² Von dem Begriff der agentenbasierten Modellierung wird für diese Arbeit zugunsten des Begriffs der akteursbasierten Modellierung Abstand genommen (vgl. Abschnitt 3.1.3).

flexibel abbildbar sein. Als Betrachtungshorizont wird das Jahr 2030 gewählt. Dies entspricht einem Kompromiss aus der Forderung nach Dynamik in dem durch lange Sanierungszyklen geprägten Wohngebäudebestand auf der einen und dem Anstieg der Unsicherheiten mit der Länge des Betrachtungszeitraums auf der anderen Seite. Als zeitliche Auflösung wird mindestens eine jährliche angestrebt.

Auf die Anpassung existierender Modelle soll verzichtet werden. Einerseits, da der Quellcode für die meisten Modelle nicht zugänglich ist und die Beschreibungen meist keine vollständige Nachvollziehbarkeit ermöglichen. Andererseits, da die Modellanforderungen – insbesondere die integrierte Modellierung von Wohngebäuden, Eigentümern und Bewohnern sowie die Modellierung auf Mikroebene – strukturelle Änderungen erforderten.

4. Charakterisierung von Gebäudeeigentümern und Bewohnern in Hinsicht auf die energetische Sanierung

Eine Kernanforderung an das zu entwickelnde simulierende, akteursbasierte, auf der Gebäudephysik basierende *Bottom-Up*-Wohngebäudebestandsmodell ist die integrierte Modellierung von Wohngebäuden sowie der Akteure⁴³ Eigentümer und Bewohner (vgl. Kapitel 3). Dadurch soll einerseits die Abbildung von Sanierungshemmnissen verbessert und andererseits die finanzielle Überforderung von selbstnutzenden Eigentümern, Mietern und Vermietern sowie Mitnahmeeffekte quantifizierbar gemacht werden. Nachdem der Wohngebäudebestand in Deutschland bereits in Kapitel 2 charakterisiert wurde, geht dieses Kapitel auf die Wohngebäudeeigentümer und -bewohner in Hinsicht auf die energetische Sanierung ein. Der Fokus liegt dabei auf den Eigentümern, da diese letztlich über energetische Sanierungen entscheiden. Da sich die Auswirkungen energetischer Sanierungen jedoch auf Eigentümer und Bewohner erstrecken, werden in diesem Kapitel auch die Mieter charakterisiert.

In Abschnitt 4.1 wird für Wohngebäudeeigentümer differenziert nach selbstnutzenden Eigentümern, privaten Vermietern und institutionellen Vermietern auf Bestimmungsfaktoren der energetischen Sanierungsentscheidung eingegangen. Bei den selbstnutzenden Eigentümern wird dabei u. a. analysiert, ob Zusammenhänge zwischen sozio-demographischen Merkmalen und der Sanierungsaktivität existieren. Zudem wird erläutert, welche Bestimmungsfaktoren der energetischen Sanierungsentscheidung durch existierende empirisch fundierte Sanierungsentscheidungsmodelle berücksichtigt werden.

In Abschnitt 4.2 wird auf den Bezug der Wohngebäudebewohner zur energetischen Sanierung eingegangen. Der Abschnitt konzentriert sich auf die Mieter, da selbstnutzende Eigentümer bereits in Abschnitt 4.1 charakterisiert werden.

⁴³ Vgl. Fußnote 10 bez. der Verwendung des Begriffs Akteur in der vorliegenden Arbeit.

Mit einer Charakterisierung des Akteursumfelds in Bezug auf die Sanierung in Abschnitt 4.3 wird die Akteursbetrachtung abgerundet. Abschließend werden in Abschnitt 4.4 basierend auf den vorherigen Abschnitten Schlussfolgerungen für die Entwicklung eines akteursbasierten Wohngebäude- und Haushaltsmodells in Kapitel 5 gezogen.

4.1 Wohngebäudeeigentümer

Entscheidungen hinsichtlich der energetischen Modernisierung von Wohngebäuden werden letztlich vom Gebäudeeigentümer (oder Bevollmächtigten in Vertretung des Eigentümers) getroffen (Ott u. a. 2005). Die bewohnten Wohnungen in Deutschland verteilen sich nach Schätzl u. a. (2007) zu 43% auf selbstnutzende Eigentümer und zu 57% auf Vermieter. Die 57% umfassen Wohnungen privater Vermieter in Mehrfamilienhäusern (24%), Wohnungen institutioneller Vermieter in Mehrfamilienhäusern (21%) und Wohnungen in Ein- und Zweifamilienhäusern (12%). Insofern sind selbstnutzende Eigentümer, private Vermieter und institutionelle Vermieter in Hinsicht auf die energetische Modernisierung wegen ihrer beträchtlichen Eigentumsanteile am Wohngebäudebestand relevant.

Nach Schätzl u. a. (2007) übersteigen die Bestandsinvestitionen in volkswirtschaftlicher Hinsicht seit 2000 die Neubauinvestitionen, im Jahr 2004 mit 73 Mrd. € zu 56 Mrd. €. Im Jahr 2003/2004 stellten Investitionen mit Energieeinsparungen 60% der KfW-Kredite dar. Die Bestandsinvestitionsprozesse im Wohnungsbestand werden durch Strategien und Motive der jeweiligen Eigentumssegmente beeinflusst. Ein zentrales Investitionshemmnis für Bestandsinvestitionen ist eine im Durchschnitt leicht negative Wertänderungsrendite. In längerfristiger Sicht ist zudem aufgrund der demographischen Entwicklung mit einem verschlechterten Investitionsklima zu rechnen (Schätzl u. a. 2007).

Stieß u. a. (2010) nennen als Bestimmungsfaktoren der energetischen Modernisierungsentscheidung bei selbstnutzenden Eigentümern Gebäude und Technik, Sanierungsanlässe, Ressourcen, Rahmenbedingungen, Einstellungen zur

Sanierung, die sozio-demographische Situation oder Lebensphase, die Einstellungen zum Bauen und Wohnen sowie Lebensstilorientierungen. In Anlehnung daran werden selbstnutzende Eigentümer, private Vermieter und institutionelle Vermieter in den folgenden Abschnitten anhand folgender Struktur charakterisiert, um Schlussfolgerungen für die akteursbasierte Modellierung der Sanierungsentscheidung ziehen zu können:

- Allgemeine Ziele für den Gebäudeerwerb und Investitionen in Gebäude
- Gebäude und Technik
- Sanierungsanlässe und -motive
- Hemmnisse für energetische Modernisierungen

Bei selbstnutzenden Eigentümern wird zudem noch auf Zusammenhänge zwischen der Sanierungsaktivität und sozio-demographischen Merkmalen sowie auf Bestimmungsfaktoren energetischer Modernisierungen in empirisch fundierten Sanierungsentscheidungsmodellen eingegangen. Die Abschnitte zu Gebäude und Technik dienen dabei, in Ergänzung zu Kapitel 2, speziell der Charakterisierung der Wohngebäude der jeweiligen Eigentumssegmente.

4.1.1 Selbstnutzende Eigentümer

Selbstnutzer bzw. selbstnutzende Eigentümer sind sowohl Anbieter als auch Nachfrager von Wohnraum. Sie können weiter in selbstnutzende Eigentümer von Ein- und Zweifamilienhäusern sowie selbstnutzende Eigentümergemeinschaften (von Mehrfamilienhäusern) differenziert werden.

4.1.1.1 Allgemeine Ziele für den Gebäudeerwerb und Investitionen in Gebäude

Die wichtigsten Motive für den Erwerb von Gebäuden und Bauinvestitionen sind die Alterssicherung, die Einsparung von Mietzahlungen, die Realkapitalbildung, persönliche Präferenzen, die Erhöhung des Wohnkomforts und mit Erbschaften in Zusammenhang stehende Motive (Schätzl u. a. 2007). Letztere umfassen bspw. die Anlage von Erbschaften oder den Erhalt geerbter Gebäude.

4.1.1.2 Gebäude und Technik

Gemäß Daten des Statistischen Bundesamts (2008a) wohnten im Jahr 2006 selbstnutzende Eigentümer zu 61% in Wohngebäuden mit einer Wohneinheit, zu 19% in Wohngebäuden mit zwei Wohneinheiten und zu 20% in Wohngebäuden mit mindestens drei Wohneinheiten. Damit dominieren die als Eigenheime bezeichneten Ein- und Zweifamilienhäuser im Vergleich zu den Wohngebäuden selbstnutzender Eigentümergemeinschaften. Wohngebäude mit selbstgenutzten Wohneinheiten wurden zu 27% vor 1949, zu 57% von 1949 bis 1990 und zu 16% nach 1990 errichtet. Bei Bezug auf die Periodenlängen zeigt sich, dass insbesondere die Baualtersklasse von 1949 bis 1990 überproportional und diejenige ab 1990 unterproportional vertreten ist. Die durchschnittliche Fläche bewohnter Eigentümerwohneinheiten übersteigt mit 118 m² diejenige von vermieteten Wohneinheiten mit 73 m² um 63%. Die Wohnfläche je Person übersteigt dahingegen diejenige der vermieteten Wohneinheiten mit 49 m² zu 38 m² nur um 29%. Die Abschwächung ist darauf zurückzuführen, dass die durchschnittliche Personenzahl je Wohneinheit bei den Selbstnutzern größer ist.

Die gemäß Daten vom Statistischen Bundesamt (2008a) am häufigsten überwiegend für die Raumwärmebereitstellung in Eigentumswohneinheiten verwendeten Energieträger waren 2006 Gas (47%), Heizöl (38%), Elektrizität (5%), Holz oder sonstige erneuerbare Energien (5%) und Fernwärme (4%). Bei vermieteten Wohneinheiten sind dahingegen Gas (50%) und Fernwärme (20%) häufiger und Öl (24%) sowie Holz oder sonstige erneuerbare Energien (2%) seltener anzutreffen. Dies kann teilweise durch den mit 77% bei den Mietwohneinheiten größeren Anteil von Gebäuden mit mindestens drei Wohneinheiten sowie die bessere Energieträgerverfügbarkeit von Gas und Fernwärme in Gebieten mit Mehrfamilienhäusern erklärt werden. Der Anteil von Gebäuden mit solarthermischen Anlagen bzw. Wärmepumpen ist bei Ein- und Zweifamilienhäusern mit 10% bzw. 2,1% höher als bei Mehrfamilienhäusern mit 2% bzw. 0,4% (Diefenbach u. a. 2010).

Nach Abbildung 8 bzw. gemäß Daten von Diefenbach u. a. (2010) wurden die überwiegend von selbstnutzenden Eigentümern bewohnten Ein- und Zweifamilienhäuser häufiger im Urzustand gedämmt und seltener nachträglich gedämmt als die überwiegend von Mietern bewohnten Mehrfamilienhäuser. Aufgrund dieser sich teilweise kompensierenden Effekte ist der Anteil der ungedämmten Bauteile bei beiden Gebäudetypen ähnlich. Dass bei Ein- und Zweifamilienhäusern bzw. Mehrfamilienhäusern im Jahr 2009/2010 64% bzw. 66% der Außenwandflächen, 28% bzw. 33% der Dachflächen und 64% bzw. 75% der Fußböden noch ungedämmt waren, verdeutlicht, dass ein großer Teil des Energieeffizienzpotenzials durch Dämmung im Wohngebäudebestand und damit sowohl bei selbstnutzenden Eigentümern als auch bei Vermietern noch nicht ausgeschöpft wurde. Nach Stieß u. a. (2010) schränken allerdings bauliche und technische Restriktionen die zur Verfügung stehenden Maßnahmenpakete ein.

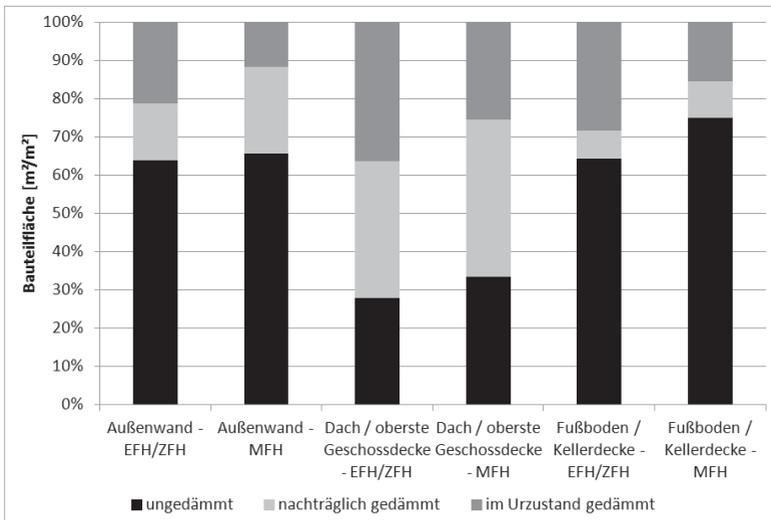


Abbildung 8: Anteile ungedämmter, nachträglich gedämmter und im Urzustand gedämmter Bauteilflächen im Wohngebäudebestand in Deutschland im Jahr 2009/2010 differenziert nach Ein-/Zweifamilienhäusern (EFH/ZFH) und Mehrfamilienhäusern (MFH) (Datengrundlage: Diefenbach u. a. 2010)

Die Häufigkeiten der von Standard-Sanierern und energetischen Sanierern gemäß einer Selbstnutzer-Befragung (vgl. Stieß u. a. 2010) umgesetzten Maßnahmen sind in Tabelle 4 angegeben. Standard-Sanierer werden dadurch von den energetischen Sanierern abgegrenzt, dass sie keine anspruchsvollen energetisch wirksamen Maßnahmen durchführen. Fenster und Heizsysteme können von diesen zwar auch ersetzt werden, allerdings wird in diesem Falle die ineffizientere Technik, bspw. 2-Scheibenverglasung und Niedertemperaturkessel, eingesetzt.

Tabelle 4: Häufigkeiten der von Standard-Sanierern und energetischen Sanierern gemäß einer Selbstnutzer-Befragung umgesetzten Maßnahmen (Datengrundlage: Stieß u. a. 2010)

Maßnahme	Häufigkeit [% der Sanierer]	
Streichen und Ausbessern der Fassade	40	
Erweiterung der Wohnfläche	7	
Einbau neuer Türen	24	
Dämmung	Am Haus	30
	Fassade/Außenwände	13
	Dach	18
	Oberste Geschossdecke	9
	Kellerdecke	3
Einbau mehrerer neuer Fenster	Summe	23
	2-Scheibenverglasung	14
	3-Scheibenverglasung	3
	3 Scheiben mit hochdämmendem Rahmen	5
Einbau einer Heizung	Summe	32
	Niedertemperaturheizung Gas/Öl	6
	Brennwertheizung Gas/Öl	11
	Einzelöfen	5
	Holzpelletheizung	4
	Elektro-Wärmepumpe	2
	Andere Art von Heizung	5
Einbau von Solarkollektoren	7	
Einbau einer Solarstromanlage	3	
Isolierung der Heizungs- und Warmwasserrohre	8	

Häufigste Maßnahme aller Sanierer ist das in 40% aller Sanierungen durchgeführte Streichen und Ausbessern der Fassade. Der Vergleich zur Dämmung der Außenwände bzw. Fassade zeigt, dass diese Maßnahme häufig ohne gleichzeitige Dämmung des Bauteils durchgeführt wird. Am häufigsten wurde das Dach bzw. die oberste Geschossdecke, gefolgt von der Fassade bzw. den Außenwänden und der Kellerdecke gedämmt. Damit wird die Erhebung von Diefenbach u. a. (2010) bestätigt. Bei den Fenstern wurde am häufigsten (14%) die im Vergleich zur 3-Scheibenverglasung mit bzw. ohne hochdämmendem Rahmen

(5% bzw. 3%) ineffizientere 2-Scheibenverglasung eingebaut. Im Gegensatz dazu dominieren bei den Gas- bzw. Ölkesseln die effizienteren Brennwertkessel die Niedertemperaturkessel. Insgesamt zeigen die Vielfalt der Maßnahmen sowie deren abweichende Häufigkeiten, dass kaum von „typischen“ Maßnahmenpaketen ausgegangen werden kann.

4.1.1.3 Sanierungsanlässe und -motive

Als Sanierungsanlässe für Selbstnutzer nennen Stieß u. a. (2010) den Erwerb, die Erweiterung bzw. den Umbau sowie die Pflege (im Folgenden Instandhaltung) der Gebäude. Diese Sanierungsanlässe determinieren häufig den Sanierungszeitpunkt. Die Zeitpunkte von Erweiterung bzw. Umbau und Instandhaltung von Gebäuden lassen sich grob auf Basis von Lebensdauern oder Sanierungszyklen und dem Alter von Gebäuden und Bauteilen abschätzen (Kost 2006). Da die Sanierungsanlässe aber nicht nur vom Lebenszyklus der Gebäude und Bauteile sondern auch vom Lebenszyklus der Eigentümer (bzw. der Bewohner) abhängen, kann die zusätzliche Einbeziehung von Informationen zum Eigentümer ggf. realistischere Schätzungen für die Sanierungszeitpunkte ermöglichen. Der Erwerbszeitpunkt wird bspw. stark durch die soziodemographische Situation bzw. die Lebensphase von Verkäufer und Käufer beeinflusst.

Gemäß einer Befragung von Selbstnutzern, die eine KfW-Förderung in Anspruch genommen haben, sind die fünf wichtigsten Motive (in der Reihenfolge abnehmender Bedeutung) für eine energetische Sanierung nach Testorf u. a. (2010):

1. Lohnende Investitionen für geringere Energiekosten
2. Unabhängigkeit von Energiepreisen
3. Beitrag zum Umweltschutz
4. Substanzerhaltung der Objekte
5. Steigerung der Wohnqualität

Die Motive sind damit primär ökonomisch geprägt, was dadurch bedingt wird, dass Selbstnutzer von der Reduktion des Energieverbrauchs unmittelbar profitieren. Auch ökologische Motive nehmen bei den Befragten einen hohen Stellenwert ein. Die Substanzerhaltung der Objekte kann als Sicherung der Daseinsgrundfunktion Wohnen im weiteren Sinne interpretiert werden. Eine Steigerung der Wohnqualität kann bspw. durch höheren thermischen Komfort oder erhöhten Bedienkomfort der Heizungsanlage erreicht werden.

4.1.1.4 Sanierungsaktivität und sozio-demographische Merkmale

Im Folgenden soll beurteilt werden, ob sozio-demographische Merkmale auch als Bestimmungsfaktor für energetische Sanierungstätigkeit herangezogen werden können. Daher wird analysiert, ob bei Selbstnutzern ein Zusammenhang zwischen energetischer Modernisierungstätigkeit und den Merkmalen *Alter*, *Haushaltsnettoeinkommen*, *Haushaltsgröße* und *Bildungsgrad* existiert. Dafür werden die Häufigkeitsverteilungen dieser Merkmale für alle Selbstnutzer sowie für selbstnutzende Sanierer, Nicht-Sanierer und energetische Sanierer basierend auf Befragungen von Stieß u. a. (2010), Testorf u. a. (2010) und dem Mikrozensus 2006 (vgl. Statistisches Bundesamt 2008c) gegenübergestellt. Abschließend wird analysiert, ob etwaige Abhängigkeiten zwischen den Merkmalen und der energetischen Sanierungstätigkeit durch Korrelationen zwischen diesen Merkmalen erklärt werden können.

Das Vorgehen weist mehrere Unsicherheiten auf. Einerseits werden bei dem Vorgehen teilweise die Verteilungen mehrerer Stichproben aus unterschiedlichen Erhebungsjahren miteinander verglichen. Andererseits beziehen sich die Befragungen von Stieß u. a. (2010) nur auf Ein- und Zweifamilienhäuser, die Befragungen von Testorf u. a. (2010) auf alle KfW-Wohngebäude-Förderungen für Selbstnutzer und private Vermieter (17% der Stichprobe) sowie der Mikrozensus 2006 (vgl. Statistisches Bundesamt 2008c) auf alle Selbstnutzer inkl. 20% Wohnungen in Mehrfamilienhäusern. Somit weisen auch die Schlussfolgerungen entsprechende Unsicherheiten bzw. Verzerrungen auf. Trotz dieser vermittelt das Vorgehen einen Einblick in die sozio-demographische Struktur

selbstnutzender Eigentümer und selbstnutzender energetischer Sanierer und gibt zumindest Hinweise auf etwaige Zusammenhänge zwischen soziodemographischen Merkmalen und der energetischen Modernisierungstätigkeit. Nebenbei wird die Verteilung der selbstnutzenden Haushaltskohorten auf die Gebäudekohorten charakterisiert.

Alter

Im Folgenden wird die These diskutiert, dass der Anteil der über 60-jährigen Selbstnutzer bei den Teilmengen der energetischen Sanierer unterrepräsentiert ist. In Tabelle 5 wird dafür die Altersverteilung von Teilmengen selbstnutzender Eigentümer bzw. Haushaltsvorstände (im Mikrozensus 2006 Haupteinkommensbezieher) gegenübergestellt. Gemäß dem Mikrozensus 2006 liegt der Anteil der über 60-jährigen Selbstnutzer an allen Selbstnutzern bei 42% (Statistisches Bundesamt 2008c). Bei den Rückläufern einer ersten Befragung von Stieß u. a. (2010) sind diese mit 47% überrepräsentiert. Der Anteil unter den Sanierern ist dabei mit 44% kleiner als unter den Nicht-Sanierern mit 49%, was die These stützt, obwohl der Anteil 42% übersteigt.

Tabelle 5: Altersverteilung von Selbstnutzern sowie selbstnutzenden Sanierern, Nicht-Sanierern und energetischen Sanierern im Vergleich

Datengrundlage	Anteil der Altersklasse der Haushaltsvorstände an	Altersklasse der Haushaltsvorstände [Jahre]							
		<30	30-40	40-50	50-60	60-70	>70	≥60	Beliebig
Erste Befragung (Stieß u. a. 2010)	Sanierer und Nicht-Sanierer	1%	13%	21%	18%	22%	25%	47%	100%
	Nicht-Sanierer	2%	14%	21%	15%	20%	29%	49%	100%
	Sanierer	1%	12%	20%	23%	26%	18%	44%	100%
Zweite Befragung (Stieß u. a. 2010)	Standard-Sanierer	3%	22%	34	31%	10%	3%	13%	100%
	Energetische Sanierer	2%	23%	33%	32%	11%	2%	13%	100%
KfW-Wohngebäude-saniererbefragung (Testorf u. a. 2010)	Energetische Sanierer (inkl. 17% private Vermieter)	0% (ca.)	10% (ca.)	28% (ca.)	29% (ca.)	24% (ca.)	12% (ca.)	36% (ca.)	103% (ca.)
	Mikrozensus 2006 - Alle Selbstnutzer (Statistisches Bundesamt 2008c)	<1919 (Baujahr)	2%	11%	21%	19%	21%	25%	46%
	1919-48	2%	11%	21%	18%	22%	26%	48%	100%
	1949-78	2%	9%	15%	18%	28%	28%	56%	100%
	1979-90	2%	7%	27%	34%	21%	9%	30%	100%
	1991-1995	1%	16%	48%	21%	10%	3%	13%	100%
	1996-2000	2%	31%	42%	16%	7%	2%	9%	100%
	2001-2004	6%	45%	33%	10%	5%	1%	6%	100%
	2005-2006	12%	53%	24%	7%	4%	1%	5%	100%
	≤1990	2%	9%	19%	21%	24%	24%	48%	100%
	Alle Altersklassen	2%	13%	23%	20%	22%	20%	42%	100%

Das Überschreiten der 42% kann damit erklärt werden, dass dies kein adäquater Vergleichswert ist. Gebäude, die bis zum Jahr 2010 zur Sanierung anstanden, sollten bei Sanierungszyklen von mindestens 20 Jahren (Kombination von VDI⁴⁴ 2067 (2000) und Kost (2006)) verstärkt Baualter vor 1990 aufweisen. Ein passenderer Vergleichswert wäre demnach der Anteil der über 60-Jährigen an allen Selbstnutzern in Gebäuden mit Baujahr bis 1990, der bei 48% liegt (Statistisches Bundesamt 2008c). Bei (weiterer) Erhöhung der Mindestsanierungszyklen steigt allgemein der Anteil der über 60-Jährigen aufgrund der Verteilung der Haushaltskohorten auf die Gebäudekohorten. Die häufigste Selbstnutzeraltersklasse, der Modalwert, steigt mit zunehmendem Gebäudealter kontinuierlich von den 30-40-Jährigen bei Baujahren ab 2001 bis zu den über 70-Jährigen bei Baujahren bis 1948 (in Tabelle 5 grau hervorgehoben).

Die 48% überschreiten den Anteil der über 60-Jährigen an den Sanierern nach Stieß u. a. (2010) um 4 %, was die These wiederum stützt. Bei längeren Mindestsanierungszyklen verstärkt sich der beobachtete Effekt.

Bei einer von Stieß u. a. (2010) durchgeführten zweiten, ausführlicheren Befragung von Standard-Sanierern und energetischen Sanierern, bei der eine Quote von je 50% energetischen und Standard-Sanierern vorgegeben wurde, ist die betrachtete Altersklasse mit 13% im Vergleich zu 48% klar unterrepräsentiert. Die Aussage gilt auch für die von Testorf u. a. (2010) durchgeführte Befragung von Wohngebäudesanierern, die eine KfW-Förderung in Anspruch genommen haben. Der Anteil der betrachteten Altersklasse beträgt dabei 36%. Die beobachteten Tendenzen verstärken sich bei der Altersklasse der über 70-Jährigen. Der Anteil dieser Altersklasse an den Sanierern (18%), den Standard-Sanierern (3%) sowie den energetischen Sanierern (2% bzw. 12%) ist im Vergleich zu dem Anteil an allen Selbstnutzern mit einem Gebäudebaualter ≤ 1990 (24%) klar unterrepräsentiert.

⁴⁴ VDI steht für Verein Deutscher Ingenieure.

Insgesamt ist die These, dass über 60-jährige und in einem verstärkten Maße über 70-jährige Selbstnutzer seltener energetisch modernisieren als jüngere Altersklassen, zumindest plausibel. Dies gewinnt dadurch aus Staatssicht an zusätzlicher Bedeutung, dass die über 60-jährigen gerade an den zur Sanierung anstehenden selbstgenutzten Wohnungen bzw. Gebäuden große Anteile halten.

Haushaltsnettoeinkommen

Tabelle 6 zeigt die Haushaltsnettoeinkommensverteilung von Selbstnutzern sowie selbstnutzenden Sanierern, Nicht-Sanierern und energetischen Sanierern. Im Vergleich zur Einkommensverteilung in Gebäuden mit Baujahr bis 1990 sind unter den KfW-geförderten Haushalten die einkommensschwachen unter- und die einkommensstarken überrepräsentiert. Die Daten von Stieß u. a. (2010) lassen diesen Schluss nicht zu. Auffallend ist allerdings, dass beide Befragungen eine Unterrepräsentation der einkommensschwachen Haushalte aufweisen, was zumindest im ersten Falle ggf. mit dem hohen Anteil von Haushalten ohne Angabe des Haushaltsnettoeinkommens erklärt werden kann. Hinsichtlich der Haushaltsnettoeinkommen ist auffallend, dass die einkommensschwachen Haushalte verstärkt in den Gebäuden bis 1990 vertreten sind. In Gebäuden mit Baujahr bis 1978 entspricht die Einkommensklasse bis 1.500 €/Monat sogar dem Modalwert. Bei Baualterklassen ab 1949 entspricht dagegen die Einkommensklasse ab 4.000 €/Monat dem Modalwert (bimodale Verteilung bei der Altersklasse von 1949-1978). Die tendenziell niedrigeren Haushaltsnettoeinkommen bei älteren Gebäuden hängen ggf. mit dem Renteneintritt der in diesen wohnenden Selbstnutzer zusammen (vgl. Tabelle 5).

Insgesamt ist es zumindest plausibel, dass Haushalte mit höherem Haushaltsnettoeinkommen in stärkerem Maße KfW-Förderungen in Anspruch nehmen als Haushalte mit niedrigerem Haushaltsnettoeinkommen. Selbstnutzerhaushalte mit niedrigerem Einkommen gewinnen zudem insbesondere dadurch an Bedeutung, dass sie häufig gerade in den zur Sanierung anstehenden Gebäuden wohnen.

Tabelle 6: Haushaltsnettoeinkommensverteilung von Selbstnutzern sowie selbstnutzenden Sanierern, Nicht-Sanierern und energetischen Sanierern im Vergleich

Datengrundlage	Anteil der Haushaltsnettoeinkommensklasse an	Haushaltsnettoeinkommensklasse [k€/Monat]								
		<1,5	1,5-2	2-2,5	2,5-3	3-3,5	3,5-4	>4	Keine Angabe	Beliebig
Erste Befragung (Stieß u. a. 2010)	Sanierer und Nicht-Sanierer	7%	5%	9%	10%	18%	9%	17%	26%	100%
	Nicht-Sanierer	6%	3%	7%	10%	16%	9%	22%	26%	100%
	Sanierer	9%	9%	12%	9%	21%	9%	6%	24%	100%
Zweite Befragung (Stieß u. a. 2010)	Standard-Sanierer	9%	8%	18%	18%	13%	13%	19%	3%	100%
	Energetische Sanierer	8%	6%	16%	16%	13%	13%	21%	7%	100%
KfW-Wohngebäude-sanierer-befragung (Testorf u. a. 2010)	Energetische Sanierer (inkl. 17% private Vermieter)	8% (ca.)	14% (ca.)	15% (ca.)	15% (ca.)	11% (ca.)	9% (ca.)	28% (ca.)	0% (ca.)	100% (ca.)
Mikrozensus 2006 - Alle Selbstnutzer (Statistisches Bundesamt 2008c)	<1919 (Baujahr)	32%	17%	13%	9%	6%	4%	19%	0%	100%
	1919-48	28%	17%	15%	10%	7%	5%	17%	0%	100%
	1949-78	22%	16%	14%	11%	9%	6%	22%	0%	100%
	1979-90	11%	10%	13%	13%	11%	9%	33%	0%	100%
	1991-1995	7%	8%	14%	14%	13%	11%	33%	0%	100%
	1996-2000	6%	9%	15%	16%	14%	11%	29%	0%	100%
	2001-2004	6%	9%	17%	17%	14%	10%	27%	0%	100%
	2005-2006	6%	9%	15%	15%	16%	12%	26%	0%	100%
	≤1990	23%	15%	14%	11%	8%	6%	23%	0%	100%
	Alle Altersklassen	20%	14%	14%	12%	9%	7%	24%	0%	100%

Haushaltsgröße

Tabelle 7 zeigt die Haushaltsgrößenverteilung von Selbstnutzern sowie selbstnutzenden Sanierern, Nicht-Sanierern und energetischen Sanierern. Kleinere Haushalte sanieren nach der ersten Befragung von Stieß u. a. (2010) häufiger als größere Haushalte. Nach der zweiten Befragung sanieren sie allerdings seltener energetisch als nicht energetisch. Da bei der zweiten Befragung jedoch kleinere Haushalte im Vergleich zu den Sanierern der ersten Befragung unterrepräsentiert sind, können keine Quervergleiche durchgeführt werden. Kleinere Haushalte sind zudem in der ersten Befragung von Stieß u. a. (2010) im Vergleich zu allen Selbstnutzerhaushalten unterrepräsentiert, sodass auch hier keine Quervergleiche durchgeführt werden können. Dies kann ggf. dadurch erklärt werden, dass die Verteilung gemäß dem Mikrozensus 2006 auch Wohnungen in Mehrfamilienhäusern umfasst.

Tabelle 7: Haushaltsgrößenverteilung von Selbstnutzern sowie selbstnutzenden Sanierern, Nicht-Sanierern und energetischen Sanierern im Vergleich

Datengrundlage	Anteil der Haushaltsgrößenklasse an	Haushaltsgrößenklasse Personen				
		1	2	3	>3	Beliebig
Erste Befragung (Stieß u. a. 2010)	Sanierer und Nicht-Sanierer	11%	36%	20%	33%	100%
	Nicht-Sanierer	5%	27%	14%	55%	100%
	Sanierer	16%	43%	25%	16%	100%
Zweite Befragung (Stieß u. a. 2010)	Standard-Sanierer	9%	24%	28%	39%	100%
	Energetische Sanierer	6%	27%	26%	41%	100%
KfW-Wohngebäudesaniererbefragung (Testorf u. a. 2010)	Energetische Sanierer (inkl. 17% private Vermieter)	5%	37%	20%	28%	100%
Mikrozensus 2006 - Alle Selbstnutzer (Statistisches Bundesamt 2008c)	<1919 (Baujahr)	26%	40%	16%	18%	100%
	1919-48	25%	42%	16%	17%	100%
	1949-78	23%	47%	15%	16%	100%
	1979-90	12%	40%	22%	27%	100%
	1991-1995	8%	28%	23%	42%	100%
	1996-2000	7%	24%	23%	46%	100%
	2001-2004	7%	23%	26%	44%	100%
	2005-2006	7%	26%	27%	39%	100%
	≤1990	22%	44%	16%	18%	100%
	Alle Altersklassen	19%	40%	18%	23%	100%

Vergleicht man die zweite Befragung von Stieß u. a. (2010) oder die KfW-Wohngebäudesaniererbefragung mit der Verteilung in allen Selbstnutzergebäuden mit Baujahr bis 1990, so sind in Letzterer die Haushaltsgrößen bis zu 2 Personen deutlich stärker vertreten. Dies spricht zwar prinzipiell dafür, dass kleinere Haushalte seltener energetisch sanieren und seltener KfW-Förderungen in Anspruch nehmen als größere Haushalte. Da die Verteilung gemäß dem Mikrozensus 2006 im Gegensatz zur Befragung von Stieß u. a. (2010) auch zu 20% Wohnungen in Mehrfamilienhäusern umfasst, die tendenziell von kleineren Haushalten bewohnt werden, ist jedoch zumindest die erste Aussage mit hoher Unsicherheit belastet.

Hinsichtlich der Haushaltsgrößenverteilung ist auffallend, dass die kleineren Haushalte verstärkt in den Gebäuden bis 1990 vertreten sind. Die Haushaltsgröße von 2 Personen entspricht bei diesen sogar dem Modalwert (in Tabelle 7 grau hinterlegt). Bei Baualtersklassen ab 1991 entspricht dagegen die Haushaltsgröße von mindestens 3 Personen dem Modalwert. Der Übergang hängt ggf. mit dem bereits erfolgten Auszug der Kinder bei den in älteren Baualtersklassen wohnenden Haushalten mit älteren Haushaltsvorständen zusammen.

Insgesamt ist es zumindest plausibel, dass Selbstnutzer mit größeren Haushalten in einem stärkeren Maße energetisch modernisieren und KfW-Förderungen erhalten als Selbstnutzer mit kleineren Haushalten. Kleinere Selbstnutzerhaushalte gewinnen zudem insbesondere dadurch an Bedeutung, dass sie häufig gerade in den zur Sanierung anstehenden Gebäuden wohnen.

Bildungsgrad

Tabelle 8 zeigt die Bildungsgradverteilung von Selbstnutzern sowie selbstnutzenden Sanierern, Nicht-Sanierern und energetischen Sanierern. Auffällig ist der hohe Anteil der energetischen Sanierer mit abgeschlossenem Studium sowie Abitur/Hochschulreife an den von der KfW geförderten Sanierern. Obwohl diese beiden Gruppen zusammen nur 21% an den Gebäuden mit Baujahr vor 1990 darstellen, haben Sie einen Anteil von 59% an den KfW-Förderungen. Entsprechend sind die niedrigeren Bildungsgrade bei den KfW-Förderungen unterrepräsentiert. Eine ähnliche Tendenz zeigt sich bei den Sanierern in beiden Befragungen von Stieß u. a. (2010).

Tabelle 8: Bildungsgradverteilung von Selbstnutzern sowie selbstnutzenden Sanierern, Nicht-Sanierern und energetischen Sanierern im Vergleich

Datengrundlage	Anteil der Bildungsgradklasse an	Bildungsgrad					
		Abgeschlossenes Studium	Abitur/Hochschulreife	Mittel-/Real-/Fach-/Handelsschule ohne Abitur	Haupt-/Volksschule mit abgeschlossener Lehre	Haupt-/Volksschule ohne abgeschlossene Lehre	Beliebig
Erste Befragung (Stieß u. a. 2010)	Sanierer und Nicht-Sanierer	12%	7%	32%	44%	6%	100%
	Nicht-Sanierer	9%	7%	28%	48%	7%	100%
	Sanierer	18%	6%	38%	35%	3%	100%
Zweite Befragung (Stieß u. a. 2010)	Standard-Sanierer	12%	14%	40%	27%	7%	100%
	Energetische Sanierer	15%	15%	38%	24%	7%	100%
KfW-Wohngebäudesaniererbefragung (Testorf u. a. 2010)	Energetische Sanierer (inkl. 17% private Vermieter)	42%	17%	20%	20%		100%
Mikrozensus 2006 - Alle Selbstnutzer (Statistisches Bundesamt 2008c)	<1919 (Baujahr)	11%	4%	19%	65%	1%	100%
	1919-48	14%	4%	16%	65%	1%	100%
	1949-78	17%	5%	16%	62%	1%	100%
	1979-90	23%	6%	8%	63%	0%	100%
	1991-1995	26%	7%	6%	61%	0%	100%
	1996-2000	26%	8%	5%	61%	0%	100%
	2001-2004	25%	9%	7%	59%	0%	100%
	2005-2006	27%	9%	6%	57%	1%	100%
	≤1990	16%	5%	15%	63%	1%	100%
	Alle Altersklassen	18%	5%	13%	63%	1%	100%

Hinsichtlich der Bildungsgradverteilung ist auffallend, dass der Haupt-/Volksschulabschluss mit abgeschlossener Lehre in allen Baualtersklassen mit ca. 57-65% Anteil den Modalwert darstellt. Die Anteile von Haushaltsvorständen mit abgeschlossenem Studium sowie Abitur oder Hochschulreife nehmen mit zunehmendem Gebäudealter ab.

Insgesamt ist es zumindest plausibel, dass Selbstnutzer mit höherem Bildungsabschluss in stärkerem Maße sanieren, energetisch sanieren und KfW-Förderungen erhalten als Selbstnutzer mit niedrigerem Bildungsabschluss. Von Bedeutung sind allerdings gerade die selbstnutzenden Haushalte mit niedrigerem Bildungsabschluss, da gerade diese überwiegend in den zur Sanierung anstehenden Gebäuden wohnen.

Abhängigkeiten zwischen Alter, Haushaltsnettoeinkommen, Haushaltsgröße und Bildungsgrad

Gemäß den vorhergehenden Erläuterungen sind bei Selbstnutzern positive Korrelationen zwischen energetischer Modernisierungsaktivität sowie Bildungsgrad des Haushaltsvorstands, Haushaltsgröße und (bedingt) Haushaltsnettoeinkommen sowie eine negative Korrelation zwischen energetischer Modernisierungsaktivität und Alter des Haushaltsvorstands zumindest plausibel. Im Folgenden wird analysiert, ob diese Korrelationen ggf. teilweise auf Korrelationen zwischen diesen sozio-demographischen Merkmalen zurückgeführt werden können. Daher sind für Selbstnutzer in Tabelle 9 die Spearman-Rangkorrelationskoeffizienten der klassierten, ordinalen Variablen *Alter*, *Bildungsgrad*, *Haushaltsgröße* und *Haushaltsnettoeinkommen* dargestellt. Die Rangkorrelationskoeffizienten zwischen *Bildungsgrad*, *Haushaltsgröße* und *Haushaltsnettoeinkommen* sind positiv, die Rangkorrelationskoeffizienten zwischen *Alter* und jeweils *Bildungsgrad*, *Haushaltsgröße* und *Haushaltsnettoeinkommen* sind negativ. Die jeweiligen Beträge liegen jedoch nur zwischen 0,225 und 0,562. Die Rangkorrelationskoeffizienten zeigen, dass die Zusammenhänge zwischen sozio-demographischen Merkmalen und energetischer Sanierungsaktivität sich (zumindest schwach) gegenseitig bedingen können.

Einerseits sind die Merkmale, die bei steigenden Ausprägungen mit steigender Sanierungsaktivität einhergehen, untereinander positiv korreliert. Andererseits ist das Merkmal, das bei steigenden Ausprägungen mit sinkender Sanierungsaktivität verbunden ist, mit den anderen Merkmalen negativ korreliert. Insofern ist es zumindest plausibel, dass Korrelationen zwischen der energetischen Sanierungstätigkeit und den betrachteten sozio-demographischen Merkmalen teilweise auf Korrelationen zwischen diesen Merkmalen zurückgeführt werden können.

Tabelle 9: Spearman-Rangkorrelationskoeffizienten⁴⁵ der klassierten, ordinalen Variablen Alter, Bildungsgrad, Haushaltsgröße und Haushaltsnettoeinkommen bei Selbstnutzern basierend auf dem SUF (*Scientific-Use-File*) des Mikrozensus 2006 (eigene Berechnung; Datengrundlage: Statistisches Bundesamt 2008c)

n=77.642	Alter	Bildungsgrad	Haushaltsgröße	Haushaltsnettoeinkommen
Alter	1,000	-0,225	-0,562	-0,317
Bildungsgrad	-	1,000	0,219	0,393
Haushaltsgröße	-	-	1,000	0,492
Haushaltsnettoeinkommen	-	-	-	1,000

4.1.1.5 Hemmnisse für energetische Modernisierungen

Stieß u. a. (2010) nennen zahlreiche Hemmnisse für energetische Modernisierungen selbstnutzender Eigentümer (in der Reihenfolge absteigender Bedeutung):

1. Mangelnde Bereitschaft zur Kreditaufnahme
2. Einstellung, dass das Haus in einem energetisch guten Zustand ist
3. Kein Interesse an über das Notwendige Hinausgehendem
4. Unklarheit über Wirtschaftlichkeit energetischer Modernisierungen
5. Keine Zeit, sich damit zu beschäftigen
6. Zu viel Dreck und Stress
7. Fehlen finanzieller Möglichkeiten
8. Kreditrahmen für Haus ist ausgeschöpft
9. Planung und Durchführung zu schwierig
10. Wirtschaftliche Zukunft ist ungewiss

⁴⁵ Vgl. Janssen & Laatz 2007 bez. des Spearman-Rangkorrelationskoeffizienten.

11. Angst vor unseriösen Anbietern/Handwerkern
12. Technologien noch nicht ausgereift
13. Aus baulichen oder technischen Gründen nicht möglich
14. Angst vor Bauschäden (Schimmel)
15. Langfristige Investitionen rechnen sich bei dem eigenen Alter nicht mehr
16. Einschränkungen durch Denkmalschutz

Diese können grob unterteilt werden in Hemmnisse mit ökonomischem (1, 4, 7, 8, 10, 15) und technischem Bezug (12, 13, 14) sowie in einstellungsbedingte (2, 3, 6, 11) und sonstige Hemmnisse (5, 9, 16). Hemmnisse mit ökonomischem Bezug umfassen dabei die größte Teilmenge. Diese Hemmnisse ergeben sich bspw. durch lange Amortisationszeiten bzw. die Unwirtschaftlichkeit einiger energetischer Modernisierungsvarianten. Das Alter bzw. die Lebensphase kann auch zum Sanierungshemmnis werden (Amelung u. a. 2012), bspw. wenn ein baldiger Umzug bzw. eine niedrige Restlebenserwartung eine Investition unvorteilhaft erscheinen lässt. Energetische Modernisierungen sind zudem mit höheren Investitionen verbunden als Instandsetzungen, sodass die Verfügbarkeit finanzieller Mittel von Bedeutung ist.

Die erwähnten Hemmnisse stehen demnach teilweise in Zusammenhang mit sozio-demographischen Merkmalen wie dem Haushaltsnettoeinkommen und dem Alter der Selbstnutzer. Gemäß dem vorigen Abschnitt besteht auch ein Zusammenhang zwischen Bildungsgrad bzw. Haushaltsgröße und energetischer Modernisierungsaktivität, wobei dies keine Ursache-Wirkungs-Beziehung darstellen muss. Einige Hemmnisse sind auch durch die Einstellungen der Selbstnutzer bedingt. Prinzipiell kann jeder Bestimmungsfaktor energetischer Sanierungen zum Hemmnis werden. Nach Stieß u. a. (2010) zählen bspw. Ressourcen, wie Wissen, soziale Netzwerke, Geld und *Do-it-yourself* Fähigkeiten, sowie behördliche und gesetzliche Rahmenbedingungen zu den Bestimmungsfaktoren der energetischen Sanierung. Deren Nichtexistenz bzw. Inadäquanz kann somit ebenfalls zum Hemmnis werden. Amelung u. a. (2012)

nennen zudem Informationskosten und die Nichteinpreisung externer Effekte⁴⁶ als Sanierungshemmnis.

4.1.1.6 Bestimmungsfaktoren energetischer Modernisierungen in empirisch fundierten Sanierungsentscheidungsmodellen

Die Eingangsvariablen empirisch fundierter Sanierungsentscheidungsmodelle wurden in Kapitel 3 erläutert. Diese stellen ebenfalls Bestimmungsfaktoren energetischer Modernisierungen dar, die wiederum in Zusammenhang mit Sanierungshemmnissen stehen. Allerdings besteht bei den Bestimmungsfaktoren dieser Modelle nicht notwendigerweise eine Ursache-Wirkungs-Beziehung. Prinzipiell werden von den betrachteten Modellen Bestimmungsfaktoren aus den oben diskutierten Bereichen

- Gebäude und Technik,
- Sanierungsanlässe und -motive,
- Sanierungsaktivität und sozio-demographische Merkmale sowie
- Hemmnisse für energetische Modernisierungen

berücksichtigt. Allerdings kann keines dieser Modelle der Heterogenität des selbstgenutzten Wohngebäudebestands, der Selbstnutzer sowie der Bestimmungsfaktoren vollständig gerecht werden. Die Modelle ermöglichen jeweils in Teilbereichen eine hohe Differenzierung, wobei andere Bereiche dafür nur aggregiert oder nicht betrachtet werden. Eine gleichzeitige starke Differenzierung in den beiden Bereichen *Gebäude und Technik* sowie *sozio-demographische Merkmale der Eigentümer* wird bspw. von keinem der Modelle geleistet. Daher eignen sich diese Modelle insbesondere, um Teilaspekte der energetischen Modernisierung des Wohngebäudebestands zu analysieren.

⁴⁶ Bei der Nichteinpreisung externer Effekte tragen z. B. die Gebäudeeigentümer und -bewohner nicht alle von ihnen verursachten Kosten. Dies ist bspw. der Fall, wenn die Energiepreise nicht die durch Treibhausgas- und Luftschadstoffemissionen bedingten Kosten umfassen (vgl. Schwermer 2007).

4.1.2 Private Vermieter

Private Vermieter sind Anbieter von Wohnraum. Nach Schätzl u. a. (2007) können sie weiter in „Amateurvermieter“⁴⁷ und professionelle Vermieter unterteilt werden. Im Jahr 2004 waren private Vermieter durchschnittlich 56 Jahre alt. Das monatliche Haushaltsnettoeinkommen betrug bei Amateurvermietern zu 52% weniger als 4.000 €, bei den professionellen Vermietern nur zu 10%. Die Einkommensklasse von 4.000 bis 8.000 € lag bei 39% bzw. 41%. Mindestens 8.000 € verdienten bei den Amateurvermietern nur 9%, bei den professionellen Vermietern dahingegen 49%. Amateurvermieter sind am häufigsten Rentner oder Pensionäre, professionelle Vermieter dahingegen Selbstständige (Schätzl u. a. 2007).

Bei Wohngebäuden, die sich im Eigentum von privaten Vermietern befinden, werden nach Ott u. a. (2005) Entscheidungen hinsichtlich einer energetischen Modernisierung von den Gebäudeeigentümern getroffen.

4.1.2.1 Allgemeine Ziele für den Gebäudeerwerb und Investitionen in Gebäude

Nach Schätzl u. a. (2007) sind bei Amateurvermietern Hauptmotive für den Gebäudeerwerb oder Bauinvestitionen Steuerersparnis, Realkapitalbildung, Alterssicherung, mit Erbschaften in Zusammenhang stehende Motive, wie bspw. die Anlage von Erbschaften oder der Erhalt geerbter Gebäude, und persönliche Gründe, wie bspw. familiäre Tradition. Bei professionellen Vermietern sind dies Steuerersparnis, Markterfordernisse sowie die Kombination von Rendite und Sicherheit. Insgesamt sind die Anlagemotive der beiden Gruppen also relativ ähnlich.

⁴⁷ Bei „Amateurvermietern“ wird im Folgenden auf Anführungszeichen verzichtet.

4.1.2.2 Gebäude und Technik

Im Eigentum privater Vermieter befinden sich ca. 14 Mio. von 39 Mio. Wohnungen in Deutschland (GdW 2007)⁴⁸. Im Jahr 2006 befanden sich vermietete Wohnungen zu 6% in Wohngebäuden mit einer Wohneinheit, zu 17% in Wohngebäuden mit zwei Wohneinheiten und zu 77% in Wohngebäuden mit mindestens drei Wohneinheiten (Statistisches Bundesamt 2008a).

Schätzl u. a. (2007) führten eine schriftliche Befragung privater Vermieter in sechs deutschen Städten durch, um die Informationsdefizite hinsichtlich des Wohngebäudebestands in deren Eigentum sowie der entsprechenden Bestandsinvestitionen zu verringern. Grundgesamtheit war der Mietwohnbestand in Mehrfamilienhäusern mit Baujahr bis 1990 im Eigentum privater Vermieter in Deutschland am 31.12.2004. Es wurde jeweils eine Stadt je Wohnungsmarkttyp ausgewählt, und die Ergebnisse wurden auf Deutschland hochskaliert.

Die privaten Vermieter sind nach Schätzl u. a. (2007) hinsichtlich soziodemographischer Eigenschaften sowie des Wohnungsbestands in ihrem Eigentum sehr heterogen. Professionelle Vermieter besitzen durchschnittlich 46 Wohneinheiten und Amateurvermieter sechs. Die Baualtersklassen des Wohnungsbestands privater Vermieter in Mehrfamilienhäusern sind zu 56% bis 1948, zu 35% 1949-1978 und zu 8% 1979-1990. Ca. 9% der Gebäude sind eingetragene Baudenkmäler. Im Vergleich zu den institutionellen Vermietern, bei denen die Baualtersklasse bis 1948 nur 16% und ab 1981 20% des gesamten Bestands umfasst (GdW 2007), sind insbesondere die älteren Gebäude überproportional vertreten. Die durchschnittliche Wohnungsgröße beträgt 70 m² und liegt damit nur knapp unter dem Durchschnitt von 73 m² aller vermieteten Wohneinheiten in Deutschland im Jahr 2006 (Statistisches Bundesamt 2008a).

⁴⁸ GdW steht für Bundesverband deutscher Wohnungs- und Immobilienunternehmen e.V.

53% der Gebäude waren 2004 in gutem bis sehr gutem Zustand, 44% teilweise renovierungsbedürftig und 4% vollständig renovierungsbedürftig. Gebäude der professionellen Vermieter waren dabei häufiger in gutem Zustand. Der Ausstattungsgrad war bei 69% der Gebäude für alle Wohnungen in zeitgemäßem Zustand, bei 29% für mindestens eine Wohnung und bei 3 % für keine Wohnung.

Die Beheizung erfolgt zu 52% über eine Block-/Zentralheizung, zu 42% über eine Etagenheizung, zu 6% über Einzel- und Mehrraumöfen, zu 4% über Fernheizung, zu 0,3% erneuerbare Energien und zu 4% über Sonstiges wie bspw. über Nachtspeicherheizungen. Der Fernwärmeanteil ist dabei im Vergleich zum Durchschnitt von 20% bei allen vermieteten Wohnungen (Statistisches Bundesamt 2008a) geringer. Dies kann allerdings auch durch die Stichprobenauswahl sowie die Art der Hochrechnung bedingt sein.

In Bezug auf die Energieeffizienz gaben die befragten privaten Vermieter an, dass 75% der Gebäude keine gedämmte Kellerdecke, 72% keine wärmege-dämmte Fassade, 46% kein wärmege-dämmtes Dach und 11% keine moderne Heizungsanlage haben. Im Vergleich zu allen Mehrfamilienhäusern (vgl. Abbildung 8) sind die ungedämmten Anteile demnach höher. Dies kann insbesondere durch den großen Anteil älterer Gebäude erklärt werden.

Die Bestandsinvestitionen privater Vermieter verteilen sich nach Schätzl u. a. (2007) zu 33% auf Maßnahmen zur Steigerung der Energieeffizienz, zu 30% auf Wohnungsmaßnahmen wie bspw. Sanitäreanlagen- oder Fußbodenerneuerungen, zu 30% auf nicht energetisch wirkende Gebäudemäßnahmen wie Dach- oder Fassadenerneuerungen sowie zu 7% auf die Wohnungsgröße verändernde Baumaßnahmen. Das Verhältnis von Modernisierungs- zu Instandsetzungsinvestitionen beträgt zwei zu eins.

Gemäß Daten von Heinze GmbH (2005) liegt der Anteil der Vermieter, die im Jahr 2004 mindestens eine Wärmedämmmaßnahme durchgeführt haben, bei Ein- und Zweifamilienhäusern mit 5,2% höher als bei Mehrfamilienhäusern mit 2,8%. Teilweise führten auch Mieter mit 1,4% bzw. 0,2% Wärmedämm-

maßnahmen durch. Für selbstnutzende Eigentümer liegen diese Werte bei 3% und 1,2%. Die eigentumsunabhängige Gesamtsanierungsrate war in Mehrfamilienhäusern mit 0,7% kleiner als in Ein- und Zweifamilienhäusern mit 2,9%.

4.1.2.3 Sanierungsanlässe und -motive

Wie für Selbstnutzer können auch für private Vermieter der Erwerb, die Erweiterung bzw. der Umbau sowie die Instandhaltung der Gebäude, aber auch der Leerstand von Gebäuden oder die Unzufriedenheit der Mieter, Sanierungsanlässe darstellen. Gemäß einer Befragung von privaten von der KfW geförderten Vermietern sind die fünf wichtigsten Motive (in der Reihenfolge abnehmender Bedeutung) für eine energetische Sanierung nach Testorf u. a. (2010):

1. Substanzerhaltung der Objekte
2. Steigerung der Wohnqualität
3. Beitrag zum Umweltschutz
4. Lohnende Investitionen für geringere Energiekosten
5. Steigerung der Mieten

Im Gegensatz zu den Selbstnutzern profitieren die Vermieter aufgrund des Vermieter-Mieter-Dilemmas nicht unmittelbar durch einen niedrigeren Energieverbrauch. Dadurch kann plausibilisiert werden, dass das wichtigste Motiv die Substanzerhaltung darstellt. Die vier wichtigsten Motive für von 2002 bis 2004 durchgeführte (nicht nur energetische) Bestandsinvestitionen durch private Vermieter sind nach Schätzl u. a. (2007):

1. Schlechter allgemeiner Gebäude- und Wohnungszustand
2. Schlechte Vermietbarkeit durch hohe Energiekosten
3. Höhere Rendite-/Mieteinnahmeerwartung
4. Schrittweise Durchführung von Sanierungsmaßnahmen

Mit Ausnahme des Beitrags zum Umweltschutz werden somit die Motive nach Testorf u. a. (2010) bestätigt.

Als die fünf wichtigsten Planungen für die nächsten Jahre gaben von Schätzl u. a. (2007) befragte private Vermieter an:

1. Kontinuierliche Instandsetzung und Modernisierung, wenn notwendig
2. Ausschließlich nur laufende Instandhaltung
3. Anpassungen der Planungen an Bedürfnisse der Mieter
4. Von der Marktlage abhängende Investitionsentscheidungen
5. Keine Planungen, da finanzielle Situation dies nicht zulässt

4.1.2.4 Sanierungshemmnisse

Die wichtigsten Investitionshemmnisse sind zu niedrige Mietniveaus und fehlendes Eigenkapital (Schätzl u. a. 2007). Das Investor-Nutzer-Dilemma steht im Zusammenhang mit den niedrigen Mietniveaus (Difu 2011)⁴⁹. Der Investor hat keinen Anreiz, zu investieren, da die Einsparung durch sinkende Energiekosten beim Mieter liegt. Dies gilt allerdings nur dann, wenn die Mieterhöhung nicht durchsetzbar ist. Die Nichtdurchsetzbarkeit liegt auch darin begründet, dass die Kosten der Wärmeversorgung von Mietern relativ selten als Entscheidungsfaktor bei der Wohnungswahl herangezogen werden. In der Folge sind selbst warmmietenneutrale Mieterhöhungen häufig nicht durchsetzbar. Zudem kann bei steigenden Energiepreisen die Warmmietenneutralität insbesondere in den ersten Jahren der Sanierung nicht gewährleistet sein. Außerdem kann der Vermieter gezwungen sein, Mietminderungen während der energetischen Modernisierungsarbeiten zu akzeptieren, allerdings nach der letzten Mietrechtsänderung nur, sofern die Dauer der Arbeiten drei Monate überschreitet (BGB 2013, §536). Insgesamt haben Vermieter häufig keinen Grund, etwas zu ändern, da sie eigentlich ohne energetische Sanierungen gut zurechtkommen. Der nach der EnEV verpflichtende Energiepass soll die Problematik durch die Erhöhung der Transparenz teilweise beheben (Difu 2011).

Basierend auf einer Befragung nennen Banfi u. a. (2012) die folgenden Gründe für das Nichtdurchführen energetischer Sanierungen in Mehrfamilienhäusern in der Schweiz (in der Reihenfolge abnehmender Bedeutung):

⁴⁹ Difu steht für Deutsches Institut für Urbanistik.

1. Kein Handlungsdruck
2. Bereits isolierte Bauteile
3. Konstruktionsbedingte Gründe
4. Fehlende finanzielle Mittel
5. Architektonische Gründe
6. Denkmalschutz
7. Spätere Durchführung von Energieeffizienzmaßnahmen
8. Nichtdurchsetzbarkeit von Mieterhöhungen auf dem Markt

Die fünf wichtigsten Gründe für das Ausbleiben von Bestandsinvestitionen sind nach einer Befragung durch Schätzl u. a. (2007) in der Reihenfolge abnehmender Bedeutung:

1. Guter Zustand der Gebäude
2. Keine Hemmnisse (!)
3. Keine Möglichkeit zur Refinanzierung wegen zu niedrigem Mietniveau
4. Fehlendes Eigenkapital
5. Haltung der Mieter zu größeren Baumaßnahmen

Auch nach Klupp u. a. (2010) existieren zwar zahlreiche Gründe, nicht zu modernisieren. Zentrales Investitionshemmnis ist jedoch das geringe Mieterhöhungspotenzial. Auch die Anforderungen der Energieeinsparverordnung 2009 werden als Investitionshemmnis hervorgehoben, das zur Unterlassung von Bestandsinvestitionen führt.

4.1.3 Institutionelle Vermieter

Die institutionellen Vermieter werden differenziert in privatwirtschaftliche Wohnungsunternehmen, kommunale bzw. öffentliche Wohnungsunternehmen sowie Wohnungsgenossenschaften (Schätzl u. a. 2007). Bei Kapitalgesellschaften kann die Bewirtschaftung inkl. energetischer Modernisierung delegiert werden (Ott u. a. 2005).

4.1.3.1 Allgemeine Ziele für den Gebäudeerwerb und Investitionen in Gebäude

Die Ziele der institutionellen Vermieter hängen nach Schätzl u. a. (2007) von der betrachteten Untergruppe ab. Die Renditemaximierung im Interesse der Gesellschafter ist wesentliches Ziel der privatwirtschaftlichen Wohnungsunternehmen. Kernelemente dafür sind ein adäquates Bestandsportfolio, Effizienz in der Bestandsverwaltung, eine maximale Ausreizung der Miethöhen sowie der Kauf und Verkauf von Bestandswohnungen. Wesentliches Ziel der kommunalen bzw. öffentlichen Wohnungsunternehmen ist die Umsetzung wohnungspolitischer Aufgaben der Kommunen. Dahingegen zielen Wohnungsgenossenschaften auf die dauerhafte Versorgung der Mitglieder mit günstigem Wohnraum ab.

4.1.3.2 Gebäude und Technik

Gemäß GdW (2007) sind in Deutschland ca. 10 Mio. von 39 Mio. Wohnungen im Eigentum institutioneller Vermieter. Im GdW sind ca. zwei Drittel der institutionellen Vermieter organisiert. Der Anteil der Modernisierungen an den Bestandsinvestitionen betrug für die im GdW organisierten Unternehmen im Jahr 2005 39% für privatwirtschaftliche Unternehmen, 41% für kommunale und öffentliche Unternehmen sowie 42% für Wohnungsgenossenschaften. Die Wohnungen der im GdW organisierten Unternehmen werden im Folgenden als GdW-Wohnungen bezeichnet.

Gemäß einer Befragung unter den GdW-Unternehmen mit Rücklauf von 51% erfolgte im Jahr 2002 die Wärmeversorgung der GdW-Wohnungen durch Fern-/Nahwärme (45%), Gaskessel zentral bzw. Gastherme (36%), Ofenheizung bzw. Einzelofen (9%), Ölkessel zentral im Gebäude (4%), Elektroheizung (2%), Blockheizkraftwerke (2%) und Wärmepumpensysteme (1%) (GdW 2007).

Bei allen vermieteten Wohneinheiten kommen dahingegen Fernwärme (20%) seltener sowie Gas (50%) und Öl (24%) häufiger vor (Statistisches Bundesamt

2008a). Der hohe Anteil an mit Fernwärme versorgten Wohneinheiten resultiert aus dem großen Anteil entsprechender Wohnungen in den neuen Bundesländern an allen GdW-Wohnungen.

Gemäß GdW (2007) entsprechen die Baujahre der GdW-Wohnungen zu 16% bis 1948, zu 20% 1949-1959, zu 26% 1960-1970, zu 18% 1971-1980 und zu 20% 1981 und später. Im Jahr 2005 unterteilten sich die Investitionen in GdW-Wohnungen zu 23% auf den Neubau, zu 46% auf die Instandhaltung/-setzung sowie zu 31% auf die Modernisierung. Der Anteil der Modernisierungsinvestitionen war bei Wohnungsgenossenschaften mit einem Anteil von 34% am höchsten, gefolgt von den kommunalen und öffentlichen Wohnungsunternehmen (32%) und den Immobilienunternehmen der Privatwirtschaft (26%). Der Anteil der unsanierten bzw. modernisierungsbedürftigen Wohnungen liegt bei den Wohnungsgenossenschaften bei 11%, bei Kapitalgesellschaften bei 17% und bei Unternehmen anderer Rechtsformen bei 29%. Die Unterschiede können sowohl durch die Bestandsstruktur sowie durch die Ziele der Unternehmen bedingt sein.

4.1.3.3 Sanierungsanlässe und -motive

Analog zu den privaten Vermietern können auch für institutionelle Vermieter der Erwerb, die Erweiterung bzw. der Umbau sowie die Instandhaltung der Gebäude Sanierungsanlässe darstellen. Gemäß einer Befragung von KfW-geförderten institutionellen Vermietern sind die fünf wichtigsten Motive (in der Reihenfolge abnehmender Bedeutung) für eine energetische Sanierung nach Testorf u. a. (2010):

1. Substanzerhaltung der Objekte
2. Steigerung der Wohnqualität
3. Beitrag zum Umweltschutz
4. Lohnende Investitionen für geringere Energiekosten
5. Nutzung staatlicher Förderung

Mit Ausnahme der Nutzung staatlicher Förderung im Gegensatz zur Steigerung der Mieten ist die Reihenfolge identisch mit derjenigen der privaten Vermieter.

4.1.3.4 Sanierungshemmnisse

Es ist davon auszugehen, dass die Sanierungshemmnisse weitgehend denjenigen der privaten Vermieter entsprechen.

4.2 Mieter

Wohngebäudebewohner sind Nachfrager von Wohnraum und unterteilen sich in selbstnutzende Eigentümer und Mieter. Letztere wohnen in Wohnungen, die Eigentum der privaten oder institutionellen Vermieter sind. Selbstnutzende Eigentümer und Vermieter wurden bereits in Abschnitt 4.1 charakterisiert. In diesem Abschnitt wird daher auf den Bezug der Mieter zur energetischen Sanierung sowie auf die in diesem Zusammenhang relevanten sozio-demographischen Merkmale von Mietern eingegangen.

4.2.1 Bezug der Mieter zur energetischen Sanierung

Die Entscheidung für oder wider energetische Sanierungen von Gebäudehülle und Anlagentechnik wird meist von den Wohngebäudeeigentümern getroffen und nicht von den Mietern. Energetische Sanierungen können allerdings einerseits den Energieverbrauch und die von den Mietern zu tragenden Energiekosten für die Wärmenutzung reduzieren, andererseits induzieren sie Modernisierungsumlagen, die zu einer Erhöhung der Kaltmiete führen. In der Folge ist eine Nichterhöhung der Warmmiete zwar möglich, aber nicht gewährleistet. Somit können teils drastische Erhöhungen der Warmmieten resultieren, insbesondere wenn energetische mit nicht energetischen Modernisierungen kombiniert werden. Vor diesem Hintergrund haben die sozio-demographischen Merkmale *Haushaltsnettoeinkommen*, *Haushaltsgröße* und *Alter* des Haupteinkommensbeziehers sowie die *Mietbelastungsquote* (Warmmiete pro Haushaltsnettoeinkommen) zumindest einen mittelbaren Bezug zur energetischen Sanierung.

Die Mieter nehmen indirekt Einfluss auf die Sanierungsentscheidung von Vermietern, da aus energetischen Modernisierungen ggf. gewünschte oder ungewünschte Mieterwechsel resultieren können. Der Vermieter muss dabei antizipieren, welche Miete bei den aktuellen bzw. alternativen Mietern durchsetzbar und aus seiner Sicht vertretbar ist. Dies ist insbesondere im Falle von Warmmietenerhöhungen relevant, die zur finanziellen Schlechterstellung der Mieter führen. Da die Energieeffizienz häufig nicht als Entscheidungskriterium bei der Wohnungsauswahl herangezogen wird (Difu 2011), können selbst warmmietenneutrale Sanierungen nicht durchsetzbar sein. *Haushaltsnettoeinkommen*, *Mietbelastungsquote* und *Haushaltsgröße* geben Hinweise auf den finanziellen Spielraum, der Haushalten verbleibt, um bspw. Warmmietenerhöhungen zu tragen. Das *Alter* des Haushaltsvorstands beeinflusst über die erwartete (Rest-)Lebensdauer die Warmmietenneutralität energetischer Modernisierungen bei steigenden Energiepreisen und kann ggf. als Indiz für die „Umzugsfreudigkeit“ von Mietern herangezogen werden. Die *Haushaltsgröße* hat, wie das Verhalten der Mieter, einen Einfluss auf den Energieverbrauch und damit auf die erzielbare Energieeinsparung im Falle von Sanierungen. *Haushaltsgröße*, *Alter*, *Haushaltsnettoeinkommen* und *Mietbelastungsquote* bedingen zudem Anforderungen an die Wohnungsgröße und die Miete. Die betrachteten sozio-demographischen Variablen sind dynamisch und bilden die Basis für eine detaillierte Betrachtung der Entwicklung des Haushaltsbestands. Diese Entwicklung bestimmt die Mieteinnahmen der Vermieter mit und nimmt demnach indirekt auch Einfluss auf die Sanierungsentscheidung.

Die sozio-demographischen Eigenschaften haben zudem Einfluss auf die Auswirkungen energetischer Modernisierungen und sind damit für die Bewertung von Entwicklungspfaden des Gebäudebestands aus Staatssicht relevant. Darin spiegeln sich teilweise die Auswirkungen wider, die der Vermieter ggf. antizipiert.

4.2.2 Sozio-demographische Merkmale von Mietern

Im Folgenden wird auf die in Bezug auf die energetische Sanierung sowie deren Auswirkungen bzw. Bewertung relevanten Merkmale *Haushaltsnettoeinkommen*, *Mietbelastungsquote*, *Alter* und *Haushaltsgröße* detailliert eingegangen. Dadurch wird einerseits der Mieterbestand in Deutschland charakterisiert und von den Selbstnutzern abgegrenzt. Andererseits wird die Bedeutung ausgewählter Aspekte quantitativ begründet.

Haushaltsnettoeinkommen

Das *Haushaltsnettoeinkommen* hat u. a. einen Einfluss darauf, inwieweit ggf. warmmietenerhöhende energetische Modernisierungen aus sozialer Perspektive ins Gewicht fallen bzw. inwieweit Haushalte in der Lage sind, Mieterhöhungen zu tragen. Die Haushaltsnettoeinkommensverteilung von Hauptmietern, die in Tabelle 10 dargestellt ist, zeigt, dass Mieter im Vergleich zu Selbstnutzern eine zu niedrigeren Einkommen verschobene Verteilung aufweisen.

Tabelle 10: Haushaltsnettoeinkommensverteilung von Hauptmietern differenziert nach Baualtersklassen (eigene Berechnung; Datengrundlage: Statistisches Bundesamt 2008c)

Anteil der Haushaltsnettoeinkommensklasse an der Baualtersklasse		Haushaltsnettoeinkommensklasse [k€/Monat]							
		<1,5	1,5-2	2-2,5	2,5-3	3-3,5	3,5-4	>4	Bellebig
Hauptmieter	<1919	54%	17%	13%	4%	6%	2%	5%	100%
	1919-48	55%	18%	13%	4%	5%	1%	3%	100%
	1949-78	52%	20%	14%	4%	6%	2%	3%	100%
	1979-90	50%	18%	14%	5%	7%	2%	4%	100%
	1991-1995	40%	19%	17%	6%	9%	2%	7%	100%
	1996-2000	38%	19%	17%	6%	9%	3%	8%	100%
	2001-2004	34%	18%	18%	6%	10%	3%	11%	100%
	2005-2006	35%	19%	13%	7%	11%	2%	12%	100%
	≤1990	53%	19%	14%	4%	6%	2%	4%	100%
	Alle Altersklassen	51%	19%	14%	4%	6%	2%	4%	100%
Selbstnutzer	≤1990	23%	15%	14%	11%	8%	6%	23%	100%
	Alle Altersklassen	20%	14%	14%	12%	9%	7%	24%	100%

Die Haushaltseinkommensklasse bis 1.500 €/Monat hat bei den Hauptmietern einen Anteil von 51%, bei den Selbstnutzern dahingegen nur von 23%. Diese niedrigste Einkommensklasse entspricht bei den Mietern auch bei Differenzierung nach Gebäudebaualtersklassen jeweils dem Modalwert der klassierten Haushaltsnettoeinkommensverteilung (in Tabelle 10 grau hinterlegt). Die Be-

deutung der niedrigsten Einkommensklasse wird dadurch verstärkt, dass sie Anteile von 50% bis 55% in den verstärkt zur Sanierung anstehenden Gebäuden mit Baujahr bis 1990 aufweist. Im Vergleich zu den Anteilen von 35% bis 40% an den Baualtersklassen ab 1991 sind diese höher. Somit wohnen einkommensschwache Mieter verstärkt in den zur Sanierung anstehenden Wohngebäuden und sind somit insbesondere für die Bewertung von Entwicklungspfaden des Gebäudebestands relevant.

Mietbelastungsquote

Die Mietbelastungsquote (Warmmiete pro Haushaltsnettoeinkommen) gibt Hinweise auf die finanzielle Belastung von Haushalten durch das Wohnen und zeigt den verbleibenden finanziellen Spielraum von Haushalten für das Tragen warmmietenerhöhender Modernisierungsumlagen. Die Mietbelastungsquotenverteilung von Hauptmietern, die in Tabelle 11 dargestellt ist, zeigt, dass Mieter mit niedrigeren Haushaltsnettoeinkommensklassen höhere Mietbelastungsquoten aufweisen.

Tabelle 11: Mietbelastungsquotenverteilung (Warmmiete pro Haushaltsnettoeinkommen) von Hauptmietern differenziert nach Haushaltsnettoeinkommensklassen (eigene Berechnung; Datengrundlage: Statistisches Bundesamt 2008c)

Anteil der Mietbelastungsquotenklasse an Haushaltsnettoeinkommensklasse [k€/Monat]	Mietbelastungsquotenklasse (Warmmiete pro Haushaltsnettoeinkommen)							
	<10%	10-20%	20-30%	30-40%	40-50%	50-60%	60-70%	>70%
<1,5	0%	3%	19%	32%	25%	11%	5%	5%
1,5-2	1%	14%	47%	29%	8%	1%	0%	0%
2-2,5	1%	28%	49%	18%	3%	0%	0%	0%
2,5-3	2%	41%	45%	11%	1%	0%	0%	0%
3-3,5	3%	48%	40%	7%	1%	0%	0%	0%
3,5-4	5%	55%	34%	5%	1%	0%	0%	0%
>4	17%	59%	21%	2%	0%	0%	0%	0%
Beliebig	2%	17%	32%	25%	14%	6%	2%	2%

Die in Tabelle 11 grau hervorgehobenen Modalwerte zeigen, dass die niedrigste Einkommensklasse am häufigsten Mietbelastungsquoten von 30% bis 40% aufweist, gefolgt von der Mietbelastungsquote von 40% bis 50%. Dies verdeutlicht, dass bei einkommensschwachen Haushalten im Sinne der Mietbelastungsquote keine vollständige Kompensation durch Wahl einer Wohnung mit niedrigerer Miete erfolgt. Somit weisen einkommensschwache Mieter bereits

im Jahr 2006 verstärkt hohe Mietbelastungsquoten auf, sodass sie bei etwaigen Erhöhungen von Warmmieten zusätzlich belastet bzw. ggf. zum Umzug gezwungen würden.

Alter

Das Alter des Haushaltsvorstands (im Mikrozensus 2006 Haupteinkommensbezieher) kann Hinweise darauf geben, inwieweit Mieter bei zunächst warmmietenerhöhenden Modernisierungsumlagen im Falle steigender Energiepreise an folgenden Warmmietenreduktionen partizipieren können. Dies wird umso unwahrscheinlicher, je kürzer die erwartete Restlebensdauer des Mieters ist. Hohes Alter kann zudem einen Hinweis auf mangelnde „Umzugsfreudigkeit“ bzw. „-fähigkeit“ bzw. auf eine Belastung älterer Menschen durch einen modernisierungsbedingten Umzug geben. Die Altersverteilung von Hauptmietern, die in Tabelle 12 dargestellt ist, zeigt zwar, dass Mieter im Vergleich zu Selbstnutzern eine zu niedrigerem Alter verschobene Verteilung aufweisen. Jedoch sind immerhin 30% aller Haushaltsvorstände von Hauptmietern mindestens 60 Jahre alt. Eine Differenzierung nach Baualtersklassen zeigt zudem, dass in der Baualtersklasse 1949 bis 1978 die Klasse der über 70-Jährigen mit 20% Anteil sogar dem Modalwert entspricht.

Tabelle 12: Altersverteilung von Hauptmietern differenziert nach Baualtersklassen (eigene Berechnung; Datengrundlage: Statistisches Bundesamt 2008c)

Anteil der Altersklasse der Haushaltsvorstände an den Baualtersklassen		Altersklasse der Haushaltsvorstände [Jahre]							
		<30	30-40	40-50	50-60	60-70	>70	≥60	Beliebig
Hauptmieter	<1919	18%	22%	20%	14%	11%	15%	26%	100%
	1919-48	16%	19%	20%	14%	13%	18%	31%	100%
	1949-78	15%	18%	19%	14%	15%	20%	34%	100%
	1979-90	18%	19%	21%	16%	12%	15%	27%	100%
	1991-1995	18%	25%	24%	13%	8%	11%	19%	100%
	1996-2000	17%	27%	21%	12%	10%	13%	23%	100%
	2001-2004	20%	31%	19%	10%	9%	11%	21%	100%
	2005-2006	27%	31%	20%	7%	8%	6%	15%	100%
	≤1990	16%	19%	19%	14%	14%	18%	32%	100%
	Alle Altersklassen	16%	20%	20%	14%	13%	17%	30%	100%
Selbstnutzer	≤1990	2%	9%	19%	21%	24%	24%	48%	100%
	Alle Altersklassen	2%	13%	23%	20%	22%	20%	42%	100%

Die betrachtete Altersverteilung bezieht sich jedoch nur auf das Jahr 2006. Bei dem in dieser Arbeit betrachteten Zeithorizont von 2006 bis 2030, d. h. von 24

Jahren, ist insbesondere das Alter in relevantem Ausmaß dynamisch. Daher sollte die Altersdynamik explizit berücksichtigt werden.

Haushaltsgröße

Die *Haushaltsgröße* unterstützt bei der Interpretation des Haushaltsnettoeinkommens in Bezug auf die finanzielle Belastung von Haushalten. Zudem sind Warmwasser- und Strombedarf von der Haushaltsgröße abhängig. Die Haushaltsgrößenverteilung von Hauptmietern, die in Tabelle 13 dargestellt ist, zeigt, dass Mieterhaushalte im Vergleich zu Selbstnutzerhaushalten häufiger Einpersonen- und seltener Mehrpersonenhaushalten entsprechen. Mieter haben damit *ceteris paribus* einen geringeren Warmwasser- und Elektrizitätsbedarf als Selbstnutzerhaushalte. Damit fallen auch die entsprechenden (absoluten) Einsparpotenziale geringer aus. Das Haushaltsnettoeinkommen muss dahingegen auf weniger Köpfe verteilt werden. Die Differenzierung der Haushaltsgrößenverteilung nach Baualtersklassen zeigt, dass bei Mietern der grau hervorgehobene Modalwert durchgängig dem Einpersonenhaushalt entspricht. Der Anteil der Einpersonenhaushalte steigt jedoch mit zunehmender Baualtersklasse der Gebäude von 39% (2005-2006) auf 51% (<1919).

Tabelle 13: Haushaltsgrößenverteilung von Hauptmietern differenziert nach Baualtersklassen (eigene Berechnung; Datengrundlage: Statistisches Bundesamt 2008c)

Anteil der Haushaltsgrößenklasse an den Baualtersklassen		Haushaltsgrößenklasse [Personen]				
		1	2	3	>3	Beliebig
Hauptmieter	<1919	51%	28%	11%	10%	100%
	1919-48	50%	30%	11%	9%	100%
	1949-78	49%	32%	11%	9%	100%
	1979-90	48%	30%	13%	10%	100%
	1991-1995	46%	30%	13%	11%	100%
	1996-2000	41%	33%	13%	12%	100%
	2001-2004	40%	33%	14%	13%	100%
	2005-2006	39%	36%	13%	11%	100%
	≤1990	49%	31%	11%	9%	100%
Alle Altersklassen		49%	31%	11%	9%	100%
Selbstnutzer	≤1990	22%	44%	16%	18%	100%
	Alle Altersklassen		19%	40%	18%	23%

4.3 Akteursumfeld

Sanierungsentscheidungen im Bereich Wärmenutzung in Wohngebäuden werden zumeist von den in Abschnitt 4.1 beschriebenen Wohngebäudeeigentümern getroffen. Allerdings beeinflussen zahlreiche Akteure⁵⁰ diese Entscheidungen. Daher wird im Folgenden ein kurzer Überblick über die entsprechenden Akteure gegeben. Insgesamt wurden die Akteure des Themenfelds Energieeffizienz und erneuerbare Energie in Gebäuden von Seitz u. a. (2013) in die folgenden fünf Gruppen unterteilt:

- Entscheider der (Energie-)Nachfrageseite
- Rahmensetzende Akteure
- Entscheider der (Energie-)Angebotsseite
- Dienstleister und Produkthersteller
- Sonstige Akteure

Entscheider der (Energie-)Nachfrageseite

Bei Sanierungen im Bereich der Wärmenutzung umfassen die Entscheider der Nachfrageseite die in Abschnitt 4.1 charakterisierten Vermieter sowie die Selbstnutzer. Sie entscheiden letztlich über die Sanierung, d. h. über die umzusetzenden Maßnahmenpakete an Gebäudehülle und Anlagentechnik, und nehmen damit eine Schlüsselrolle für die Beantwortung der Hauptforschungsfrage ein. Beim Neubau zählen zudem Wohnungsbaugesellschaften zu den Entscheidern der Nachfrageseite (vgl. Fath & Stengel 2012). Diese sind jedoch aufgrund der Fokussierung auf die Sanierung nur von untergeordneter Bedeutung.⁵¹

⁵⁰ Vgl. Fußnote 10 bez. der Verwendung des Begriffs Akteur in der vorliegenden Arbeit.

⁵¹ Der Neubau wird im Rahmen der vorliegenden Arbeit auch berücksichtigt (vgl. Abschnitt 5.4.6). Der Detaillierungsgrad ist dabei allerdings niedriger als bei der Sanierung. Der für die Sanierung verwendete detaillierte Ansatz lässt sich aber prinzipiell auf den Neubau übertragen.

Rahmensetzende Akteure

Die rahmensetzenden Akteure umfassen den Staat in seiner Rolle als Gesetzgeber, Förderer und Bereitsteller von Informationen. Der Staat setzt umweltpolitische Instrumente mit Auswirkungen auf Wohngebäudesanierung und -neubau ein. Die auf nationaler Ebene wichtigsten ordnungsrechtlichen, ökonomischen und sozioökonomischen Instrumente wurden in Abschnitt 2.3.1 beschrieben. Auf regionaler und lokaler Ebene beeinflusst die öffentliche Hand bzw. die Kommune zudem als Raum- und Infrastrukturplaner sowie Umweltbehörde sowohl die Sanierung als auch den Neubau von Wohngebäuden (vgl. Fath & Stengel 2012). In einem Praxisleitfaden vom Difu (2011) für den Klimaschutz in Kommunen werden die Handlungsoptionen von Kommunen detailliert beschrieben.

Entscheider der (Energie-)Angebotsseite

Zu den Entscheidern der Angebotsseite zählen private und öffentliche Energieversorger sowie weitere Energiedienstleister (vgl. Seitz u. a. 2013). Diese sind u. a. im Bereich der Wärmenutzung in Bezug auf die Verfügbarkeit und Wirtschaftlichkeit der Energieträger Fern- bzw. Nahwärme und Gas relevant. Die Erreichbarkeit sowie die Wirtschaftlichkeit entsprechender technischer Lösungen aus Sicht der Entscheider der Nachfrageseite werden daher durch diese Akteure beeinflusst.

Dienstleister und Produkthersteller

Die Dienstleister und Produkthersteller umfassen ein weites Spektrum an Akteuren. Dieses reicht von den Banken und Bausparkassen über Architekten und Schornsteinfeger, Energieberater und Umweltingenieure, Energieagenturen, Produkthersteller und -händler, Handwerk und Baugewerbe sowie Verwalter bis zu sonstigen Dienstleistern wie Zertifizierungsstellen und Maklern (vgl. Fath & Stengel 2012). Wegen ihrer relativ großen Einflussmöglichkeiten in Bezug auf die Wärmenutzung in Gebäuden wurden institutionelle Energieberater (mit dem Sonderfall der Stadtwerke), Architekten und Ingenieure, An-

lagenmechaniker für Sanitär-, Heizungs- und Klimatechnik sowie Schornsteinfeger von Jahnke (2009a) detailliert charakterisiert.

Sonstige Akteure

Zu den sonstigen Akteuren zählen einerseits die in Abschnitt 4.2 charakterisierten Mieter, die insbesondere für die Bewertung von Entwicklungspfaden des Gebäudebestands von Interesse sind. Andererseits können auch Wissenschaftler, Presse und Medien sowie die allgemeine Öffentlichkeit dazugezählt werden (vgl. Seitz u. a. 2013).

4.4 Schlussfolgerungen

Basierend auf den vorherigen Abschnitten werden im Folgenden Schlussfolgerungen für die Entwicklung eines integrierten Wohngebäude- und Haushaltsmodells in Kapitel 5 gezogen.

Differenzierte Eigentumsstruktur

Aufgrund der Heterogenität der Wohngebäudeeigentümer (vgl. Abschnitt 4.1) sollten diese nach Eigentumsstrukturen differenziert werden. Auch bei entsprechender Differenzierung nach selbstnutzenden Eigentümern sowie privaten und institutionellen Vermietern sind die Gruppen hinsichtlich der Motive für eine energetische Sanierung sowie Einstellungen zum Bauen und Wohnen bzw. allgemeinen Zielen und damit auch in Bezug auf die von ihnen getroffenen Sanierungsentscheidungen noch heterogen. Daher ist prinzipiell eine möglichst hohe Granularität der Eigentumsstruktur und der sich daraus ergebenden Akteursgruppen anzustreben. Allerdings ist dabei auch die Datenverfügbarkeit zu berücksichtigen.

Bedeutung sozio-demographischer Variablen

Gemäß Abschnitt 4.1.1 ist es zumindest plausibel, dass bei Selbstnutzern positive Korrelationen zwischen energetischer Modernisierungsaktivität sowie *Bildungsgrad* des Haushaltsvorstands, *Haushaltsgröße* und (bedingt) *Haushaltsnettoeinkommen* sowie eine negative Korrelation zwischen energetischer

Modernisierungsaktivität und *Alter* des Haushaltsvorstands existieren. Daher sollten die sozio-demographischen Variablen *Alter*, *Haushaltsnettoeinkommen*, *Haushaltsgröße* und *Bildungsgrad* in ein integriertes Wohngebäude- und Haushaltsmodell einbezogen werden. Diese Variablen sind allerdings nicht unabhängig. Eine quantitative Berücksichtigung des Zusammenhangs dieser Variablen und der Sanierungsentscheidung gestaltet sich jedoch bei der aktuellen Datenlage als schwierig. Eine Zuordnung von Minderungspotenzialen für Emissionen und Energieverbrauch zu Haushalten mit entsprechender sozio-demographischer Charakterisierung kann allerdings unabhängig davon durchgeführt werden und ermöglicht eine qualitative Interpretation. Gemäß Abschnitt 4.2 haben bei Mietern die sozio-demographischen Merkmale *Haushaltsnettoeinkommen*, *Mietbelastungsquote*, *Haushaltsgröße* und *Alter* des Haushaltsvorstands zumindest einen indirekten Einfluss auf die energetische Sanierungsaktivität der Vermieter. In einem integrierten Wohngebäude- und Haushaltsmodell werden sozio-demographische Merkmale zudem als Basis für die Modellierung der Haushaltsbestandsentwicklung benötigt. Die sich verändernden Haushaltscharakteristika geben dabei Hinweise darauf, welche Wohnungscharakteristika zu den Haushalten passen und in welche Gebäude die Haushalte ggf. umziehen. Zudem sind sie für die Bewertung energetischer Modernisierungen und der sich ergebenden Wohngebäudeentwicklungspfade aus Staatssicht relevant. Darüber hinaus ist der Warmwasserbedarf (sowie der Elektrizitätsbedarf) von der Haushaltsgröße abhängig, was auch für eine Integration sozio-demographischer Merkmale in ein derartiges Modell spricht.

Flexibler, szenariobasierter Ansatz

Aufgrund der Heterogenität der Wohngebäudeeigentümer und der Datenlage (vgl. Abschnitt 4.1) sowie aufgrund der jeweiligen Vorteile von empirischen und annahmenbasierten Ansätzen (vgl. Abschnitt 3.2), sollte für die Modellierung der Sanierungsentscheidung ein flexibler Ansatz gewählt werden. Dieser sollte differenziert nach der Eigentumsstruktur im Rahmen von Szenarien sowohl den Einsatz von empirischen als auch annahmenbasierten

(Teil-)Ansätzen ermöglichen. Empirische Sanierungsentscheidungsmodelle sind wegen der Datenlage (vgl. Abschnitt 3.2) nur für selbstnutzende Eigentümer anwendbar und berücksichtigen keine Änderungen über die Zeit, ermöglichen allerdings empirisch fundierte Ergebnisse für selbstgenutzte Gebäude. Für vermietete Gebäude sind annahmenbasierte Ansätze notwendig, die auf Entscheidertypen bzw. -strategien beruhen. Für selbstgenutzte Gebäude sind diese ebenfalls notwendig, falls technische oder ökonomische Reduktionspotenziale bestimmt werden sollen oder ein konsistenter Ansatz angewendet werden soll. Die Zuordnung konkreter Gebäudeeigentümer zu diesen Entscheidertypen und -strategien kann wiederum empirisch begründet sein oder auf Annahmen basieren. Ein Sonderfall ist die Zuordnung aller Entscheider zu einem Typ bzw. einer Strategie.

Vielfalt der Einflussfaktoren

Prinzipiell sollten sich Entscheidertypen und -strategien an den Motiven und Hemmnissen energetischer Sanierungen orientieren. Daher sollten in die entsprechenden Sanierungsentscheidungsmodelle Kennwerte eingehen, die die vielfältigen Motive und Hemmnisse der Wohngebäudeeigentümer widerspiegeln können. Diese Kennwerte, in dieser Arbeit auch Indikatoren genannt, sollten daher zumindest die Bereiche *Wirtschaftlichkeit*, *Umwelt* und *Hemmnisse* abdecken.

Wirkung sozio-demographischer Variablen auf die Sanierungsentscheidung

Der (plausibilisierte) Zusammenhang zwischen sozio-demographischen Variablen und dem Sanierungsgeschehen kann berücksichtigt werden, indem entsprechende Variablen ebenfalls Eingangsgröße eines (empirischen oder annahmenbasierten) Sanierungsentscheidungsmodells sind oder die Zuordnung konkreter Entscheider zu einem Entscheidertyp bzw. einer -strategie beeinflussen. Die Beeinflussung der Zuordnung kann wiederum empirisch oder annahmenbasiert sein.

Akteursumfeld

Der Staat – bzw. die rahmensetzenden Akteure – bestimmt die einzusetzenden (hoheitlichen) umweltpolitischen Instrumente und beeinflusst dadurch die Sanierungsentscheidung, die letztlich von den Wohngebäudeeigentümern, den Entscheidern der Nachfrageseite, getroffen wird. Daher ist eine explizite Berücksichtigung der Entscheider der Nachfrageseite sowie der rahmensetzenden Akteure für die Beantwortung der Hauptforschungsfrage notwendig. Um die sich durch föderale Struktur und kommunale Selbstverwaltung ergebende Komplexität möglichst gering zu halten, sollte sich die Betrachtung der rahmensetzenden Akteure auf die nationale Ebene konzentrieren. Mieter sollten wegen ihrer Bedeutung für die Bewertung von Entwicklungspfaden des Gebäudebestands detailliert betrachtet werden. Entscheider der Angebotsseite, Dienstleister und Produkthersteller sowie sonstige Akteure mit Ausnahme der Mieter sind dahingegen insbesondere wegen ihrer Vielfalt nicht explizit abzubilden. Sie sollten allerdings bspw. durch die Einschränkung der technisch zulässigen Maßnahmenpakete teilweise am Rande berücksichtigt werden.

5. Entwicklung des aktorsbasierten Wohngebäude- und Haushaltsmodells *AWOHM*

In diesem Kapitel wird das Modell *AWOHM* (Akteursbasiertes Wohngebäude- und Haushaltsmodell) gemäß den in den vorhergehenden Kapiteln spezifizierten Anforderungen entwickelt. Dabei werden die in Kapitel 3 aufgezeigten zentralen Forschungslücken als Modellanforderungen aufgegriffen und mit einem eigenständigen Lösungsansatz weitgehend geschlossen. In diesem wird der Modelltyp der Wohngebäudebestandsmodelle zu einem integrierten Wohngebäude- und Haushaltsmodell für den Bereich Wärmenutzung erweitert, das Simulation und Nachhaltigkeitsbewertung plausibler und konsistenter Entwicklungspfade des Gebäude- und Haushaltsbestands in Abhängigkeit von Bündeln umweltpolitischer Instrumente unter Berücksichtigung von Unsicherheiten ermöglicht. Darüber hinaus werden auf der Clusteranalyse basierende Ansätze zur Um- und Ausgestaltung umweltpolitischer Instrumente entwickelt, die den auf Mikroebene simulierten Modellinput und -output nutzen. Dadurch lassen sich in Bezug auf die Ausgestaltung umweltpolitischer Instrumentenbündel im Bereich Wärmenutzung in Wohngebäuden neue Erkenntnisse generieren und somit nicht nur in methodischer sondern auch in anwendungsorientierter Hinsicht originäre Beiträge leisten.

In Abschnitt 5.1 werden zunächst die Modellanforderungen zusammenfassend dargestellt. In Abschnitt 5.2 werden im Rahmen eines Überblicks über *AWOHM* kurz die einzelnen Modellelemente beschrieben. In Abschnitt 5.3 wird auf die integrierte Abbildung von Wohngebäude- und Haushaltsbestand (in Abgrenzung zur Bestandsveränderung) sowie die Ermittlung des Startbestands eingegangen. Die aktorsbasierte Modellierung der Bestandsentwicklung wird für Gebäude in Abschnitt 5.4 und für Haushalte in Abschnitt 5.5 beschrieben. Szenarien und Unsicherheiten werden in Abschnitt 5.6 diskutiert. Die Beschreibung von Szenariobewertung und multivariater Analyse der Modellergebnisse erfolgt in Kapitel 6.

In *AWOHM* werden die Akteure⁵² Wohngebäudeeigentümer, Mieter und Staat berücksichtigt. Die Gebäudebestandsentwicklung basiert auf Simulationen der Entscheidungen der aktorsbasiert abgebildeten Gebäude- bzw. -wohnungseigentümer, die in *AWOHM* in selbstnutzende Eigentümer⁵³ und Vermieter⁵⁴ unterteilt werden. Die Haushaltsbestandsentwicklung umfasst die Dynamik der selbstnutzenden Eigentümer und der Mieter. Die Dynamik der Vermieter wird zwar, sofern diese Haushalte sind, von der Haushaltsbestandsentwicklung implizit abgedeckt. In *AWOHM* hat diese jedoch datenlagenbedingt⁵⁵ nahezu⁵⁶ keine Auswirkung auf die Gebäudebestandsentwicklung. Der Staat wird derart berücksichtigt, dass *AWOHM* auf seine Unterstützung abzielt, indem seine Handlungsoptionen in Szenarien integriert werden und die Szenariobewertung aus seiner Sicht erfolgt.

Da die Vermieter in *AWOHM* quasi statisch und die Bewohner, d. h. die selbstnutzenden Eigentümer und die Mieter, dynamisch auf Haushaltsebene modelliert werden, bezieht sich der Modellname *AWOHM* auf die Bewohner bzw. die Haushalte.

5.1 Modellanforderungen

Übergeordnetes Ziel des *AWOHM* ist die Beantwortung der Hauptforschungsfrage „Welche Bündel umweltpolitischer Instrumente sind für den Bereich der Wärmenutzung in Wohngebäuden geeignet, um die Treibhausgas- und Luftschadstoffemissionen sowie den Primärenergieverbrauch zu reduzieren?“.

⁵² Vgl. Fußnote 10 bez. der Verwendung des Begriffs Akteur in der vorliegenden Arbeit.

⁵³ Diese werden in *AWOHM* weiter in (1) rein selbstnutzende Eigentümer und (2) selbstnutzende Eigentümergemeinschaften unterteilt.

⁵⁴ Diese werden in *AWOHM* weiter in (3) Amateurvermieter mit teils selbstgenutztem Gebäude, (4) Amateurvermieter mit vollständig vermietetem Gebäude und (5) professionelle oder institutionelle Vermieter unterteilt.

⁵⁵ Bei einem vollständig vermieteten Gebäude enthält das SUF keine Informationen darüber, Eigentum welches konkreten Akteurs dieses ist.

⁵⁶ Eine Ausnahme sind die Amateurvermieter mit teils selbstgenutztem Gebäude.

Gemäß den in Kapitel 3 und 4 abgeleiteten Anforderungen an das Modell (und dessen Anwendung) sollen dabei

- bei einem Betrachtungshorizont bis 2030 mit mindestens jährlicher Auflösung
- die Wirkung umweltpolitischer Instrumente flexibel abgebildet,
- Wohngebäude, Anlagentechnik, Eigentümer und Bewohner integriert und *bottom-up* modelliert,
- sozio-demographische Variablen für Selbstnutzer und Mieter berücksichtigt,
- die Sanierungsentscheidung mittels eines flexiblen, szenariobasierten Ansatzes aktorsbasiert über empirische oder annahmenbasierte Sanierungsentscheidungsmodelle abgebildet,
- die Bewertung an der deutschen Nachhaltigkeitsstrategie ausgerichtet,
- Entwicklungspfade auf Mikroebene, d. h. auf der Ebene einzelner Gebäude und Haushalte, modelliert,
- Luftschadstoffemissionen sowie deren räumliche Verteilung, Umverteilungswirkungen und finanzielle Überlastungen einkommensschwacher Haushalte in die Bewertung aus Staatssicht einbezogen,
- mittels multivariater Analyseverfahren umweltpolitische Instrumente neu- bzw. umgestaltet und Instrumentenbündel an unterschiedliche Zielgruppen angepasst,
- Unsicherheiten in den Daten explizit berücksichtigt und
- das Modell transparent beschrieben werden.

5.2 Überblick über *AWOHM*

AWOHM wurde gemäß den im vorigen Abschnitt spezifizierten Anforderungen entwickelt und in MATLAB R2011b implementiert. Eingearbeitet in den Stand der Wissenschaft entspricht dieses Modell einer Weiterentwicklung des Modelltyps der simulierenden, auf der Gebäudephysik basierenden *Bottom-Up* Wohngebäudebestandsmodelle (vgl. Kapitel 3).

Abbildung 9 bettet *AWOHHM* in den Analyseprozess zur Beantwortung der Hauptforschungsfrage der vorliegenden Arbeit ein. Für unterschiedliche (1) Szenarien (und damit umweltpolitische Instrumentenbündel) werden mithilfe von (2) *AWOHHM* Gebäude- und Haushaltsentwicklungspfade von 2006 bis 2030 simuliert. Darauf aufbauend werden einerseits eine (4) Bewertung aus Staatssicht mittels Indikatoren und andererseits (5) multivariate Analysen der (direkten) Modellergebnisse durchgeführt. Eine (3) Unsicherheitsanalyse des Modells bzw. des Modelloutputs erfolgt durch die Variation unsicherer Parameter in Szenarien, bspw. im Rahmen einer *Monte-Carlo-Simulation*⁵⁷, sowie durch den Abgleich der Modellergebnisse mit exogenen Daten. Unsicherheitsanalyse, Szenariobewertung und multivariate Analyse liefern Input für (6) Erkenntnisse, die die Beantwortung der Hauptforschungsfrage ermöglichen und primär für den Staat bzw. für Exekutive, Legislative und Förderer von Interesse sein können.

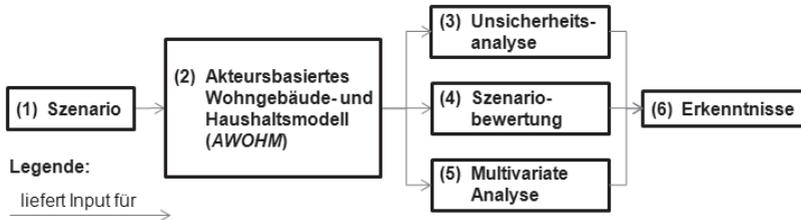


Abbildung 9: Einbettung von *AWOHHM* in den Analyseprozess zur Beantwortung der Hauptforschungsfrage

Mithilfe von *AWOHHM* können Ergebnisse mit einer räumlichen Auflösung bis zur Gemeindeebene und einer zeitlichen Auflösung bis zu Monaten erzeugt werden. Eine kartengestützte Visualisierung der Ergebnisse wird auf Kreisebene unterstützt. Nach einer Kurzbeschreibung der jeweiligen Modellelemen-

⁵⁷ *Monte-Carlo*-Methoden umfassen nach Theis & Kernbichler (2002) numerische Methoden, bei denen Zufallszahlen u. a. zur Simulation von Prozessen eingesetzt werden. Dieser Anwendungsfall wird im Folgenden als *Monte-Carlo-Simulation* bezeichnet.

te werden diese ab Abschnitt 5.3 detailliert erläutert. Es wurde auf eine äußerst transparente Darstellung geachtet.

(1) Szenario⁵⁸

Ein Szenario spezifiziert in *AWOHM* neben einem umweltpolitischen Instrumentenbündel auch Entscheidungsansätze, aktivierte Module, Realisationen von Zufallsvariablen und sonstige unsichere Parameter.

Die modellierten umweltpolitischen Instrumente umfassen ordnungsrechtliche Instrumente, Steuervorschriften, finanzielle Förderprogramme und Informationskampagnen. Ordnungsrechtliche Instrumente stellen bspw. Mindestanforderungen an die energetische Qualität der Gebäudehülle sowie die Qualität der Anlagentechnik bei Neubau bzw. Sanierung. Finanzielle Förderungen, wie bspw. Kredite mit günstigen Konditionen, werden als finanzielle Zuschüsse für Verbesserungen der Anlagentechnik und der Gebäudehülle modelliert. Steuervorschriften umfassen Energiesteuern sowie die Möglichkeit zur Einführung der steuerlichen Absetzbarkeit energetischer Modernisierungen bei selbstnutzenden Eigentümern. Die Wirkung von Informationskampagnen kann indirekt durch strukturelle Änderungen im simulierten Entscheidungsverhalten (vgl. *Entscheidungsansätze* im nächsten Absatz) berücksichtigt werden. Die Instrumente verfügen über unterschiedliche Intensitätsstufen. Die Intensität kann für jede Simulationsperiode, d. h. jedes Jahr⁵⁹, separat gesetzt werden, um die schrittweise Verschärfung umweltpolitischer Instrumente abbilden zu können. Die Gesamtheit aller Instrumente mit ihren jeweiligen Ausprägungen für jede Simulationsperiode wird als Bündel umweltpolitischer Instrumente bzw. *umweltpolitisches Instrumentenbündel* bezeichnet.

⁵⁸ Eine ausführliche Beschreibung findet sich in Abschnitt 5.6.1.

⁵⁹ Die primäre zeitliche Modellauflösung ist jährlich. Anhand der monatlichen Heizgradtagverteilung können Energieverbrauchs- und Emissionsverläufe in monatlicher Auflösung berechnet werden.

Bei der Simulation der Auswirkungen konkreter Bündel umweltpolitischer Instrumente nimmt menschliches Verhalten in Form von Sanierungsentscheidungen eine zentrale Rolle ein. Da dieses nur mit großer Unsicherheit abgebildet werden kann, werden für die jeweiligen Eigentümerstrukturen der Gebäude unterschiedliche, teils annahmenbasierte, teils empirisch fundierte *Entscheidungsansätze* gegenübergestellt (vgl. Kapitel 3). Welche Entscheidungsansätze bei einem Modelllauf verwendet werden, wird in dem jeweiligen Szenario festgelegt.

AWOHM unterteilt sich in hierarchisch angeordnete *Module*⁶⁰. Welche Module bei einem Modelllauf aktiviert bzw. deaktiviert sind, wird in dem jeweiligen Szenario spezifiziert. Für die Modellierung der Wohngebäude- und Haushaltsentwicklung werden teilweise Zufallsvariablen verwendet. Deren *Realisationen* in einem Modelllauf sind ebenfalls Bestandteil eines Szenarios. Das Modell umfasst zudem mehrere *sonstige unsichere Parameter* wie bspw. Raumsolltemperaturen, die Länge von Sanierungszyklen und Energieträgerpreise. Diese werden ebenfalls in einem Szenario festgelegt.

(2) *AWOHM* ⁶¹

Eine Übersicht über *AWOHM* zeigt Abbildung 10. Basis des Modells bilden Kohorten⁶² der Wohngebäude und der Haushalte, die jeweils nach Baualter bzw.

⁶⁰ Diese umfassen die Gebäudedynamik mit den Teilmodulen Sanierung, Neubau und Abbruch sowie die Haushaltsdynamik (im weiteren Sinne) mit den Teilmodulen Haushaltsveränderung im engeren Sinne, Wohnungsmarktwechsel und Wohnungssuche. Die Haushaltsveränderung im engeren Sinne umfasst die Teilmodule Altern, Sterben, Einkommensveränderung, Geburten, Kinderauszug, Zusammenlegen und Teilen (von Haushalten). Abbildung 10 abstrahiert von diesen Modulen zugunsten einer analogen Darstellung für Gebäude- und Haushaltsbestand.

⁶¹ Eine ausführliche Beschreibung findet sich in den Abschnitten 5.3 (integrierte Abbildung von Wohngebäude- und Haushaltsbestand), 5.4 (Gebäudebestandsveränderung) und 5.5 (Haushaltsdynamik).

⁶² Eine Kohorte ist eine "Personengruppe mit gemeinsamen zeit- bzw. jahrgangsspezifischen demografischen Merkmalen (Geburtskohorte, Heiratskohorte)" (Mosena & Winter 2014). Der Begriff kann auf Gebäude übertragen werden.

Geburtsjahr/Haushaltsalter und sonstigen Gebäude- bzw. Haushaltscharakteristika differenziert werden. Der Wohngebäudebestand wird durch Neubau, Abbruch⁶³ sowie Sanierung verändert, der Haushaltsbestand durch neue Haushalte sowie die Elimination und die Veränderung von Haushalten. Die Modellierung der Entwicklungspfade von Wohngebäuden (inkl. Anlagentechnik) und Haushalten erfolgt auf Mikroebene, d. h. auf der Ebene einzelner Gebäude und Haushalte, mit entsprechenden Faktoren zur Hochrechnung auf Deutschland. Grundlage hierfür ist das *Scientific-Use-File* des Mikrozensus 2006, eine 0,7%-Stichprobe des Wohnungs- und Haushaltsbestands in Deutschland mit Daten zu ca. 227.000 Haushalten in Wohngebäuden. Durch die breite Datenbasis kann einerseits der Heterogenität des betrachteten Systems im Vergleich zu rein typologiebasierten Ansätzen Rechnung getragen werden (vgl. Abschnitt 5.3). Andererseits werden hierdurch multivariate Analysen der Modellergebnisse ermöglicht.

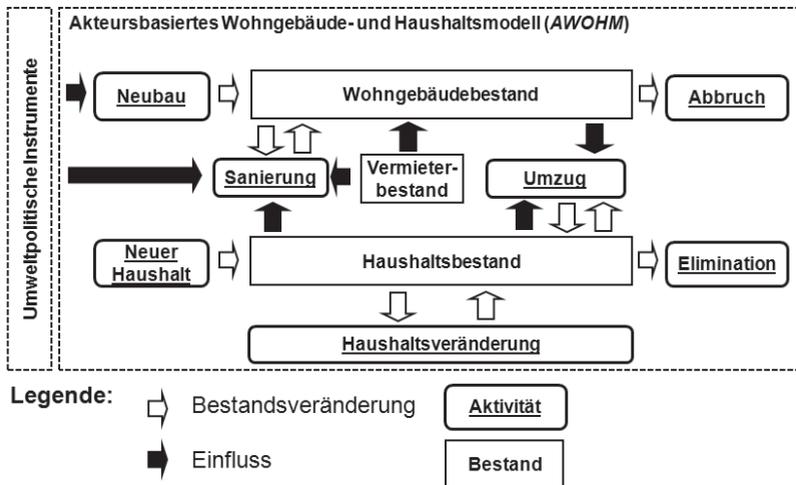


Abbildung 10: Übersicht über AWOHM

⁶³ Vgl. Fußnote 26 bez. des Begriffs Abbruch.

Neubau und Sanierung werden durch umweltpolitische Instrumente beeinflusst. Steht ein Gebäude zur Sanierung an, erfolgt die Auswahl einer Sanierungsvariante aus einer endlichen Menge an Alternativen durch die als Akteure abgebildeten Gebäude- und Wohnungseigentümer, d. h. den Haushaltsbestand oder den Vermieterbestand. Je nach Szenario werden hierbei empirisch begründete oder annahmenbasierte Sanierungsentscheidungsmodelle verwendet (vgl. Kapitel 3). Die Akteure werden dabei jeweils gemäß einer in den Entscheidungsansätzen definierten Logik vorgegebenen parametrisierten Sanierungsentscheidungsmodellen zugeordnet. Die Eigentumsstruktur sowie Eigenschaften der Bewohner, ihrer Wohnsituation und der Eigentümer beeinflussen dabei diese Zuordnung oder gehen als Variablen in die Sanierungsentscheidungsmodelle ein.

Haushalte können durch die Aufteilung von Haushalten oder den Zuzug aus dem Ausland neu entstehen, verändern ihr Alter, ihr Einkommen sowie ihre Zusammensetzung und können durch den Wegzug ins Ausland oder das Versterben des letzten Haushaltsmitglieds eliminiert werden. Zudem können die Haushalte innerhalb von Deutschland entweder im selben oder in einen anderen Wohnungsmarkt (definiert durch Bundesland und Gemeindegrößenklasse) umziehen. Der Umzug wird durch die Haushaltseigenschaften, die leerstehenden Wohnungen und somit auch durch die um leerstehende Wohnungen konkurrierenden Haushalte beeinflusst. Die Vermieter beeinflussen die Umzüge indirekt durch das Festsetzen von Mieten und die Sanierung von Gebäuden.

(3) Szenariobewertung⁶⁴

Die Bewertung von Szenarien bzw. das Aufzeigen der Auswirkungen von Bündeln umweltpolitischer Instrumente erfolgt über einen Satz von Indikatoren, der auf die Sichtweise des Staates bzw. von Exekutive, Legislative und Förderer ausgerichtet ist. Dabei werden die ökonomische, ökologische und soziale Dimension der Nachhaltigkeit bzw. konkret die Dimensionen *Generationenge-*

⁶⁴ Eine ausführliche Beschreibung findet sich in Abschnitt 6.1.

rechtigkeit, Lebensqualität und *sozialer Zusammenhalt* berücksichtigt⁶⁵. In Abgrenzung zu häufig auf Treibhausgase, Primärenergie, Investitionen und Energiekosten abzielenden Wohngebäudebestandsmodellen (vgl. Kapitel 3) werden insbesondere auch Luftschadstoffemissionen (NO_x, SO₂, VOC, NMVOC und PM) sowie deren räumliche Verteilung, Umverteilungswirkungen und finanzielle Überlastungen einkommensschwacher Haushalte in die Bewertung aus Staatssicht einbezogen. Der Indikatorensatz ist an die zur deutschen Nachhaltigkeitsstrategie (vgl. Bundesregierung 2002) gehörenden Nachhaltigkeitsindikatoren (vgl. Statistisches Bundesamt 2010) angelehnt. Er ist in inhaltlicher Hinsicht hierarchisch untergliedert, sodass sich fünf Ebenen im Indikatorensystem ergeben. Mehrere Indikatoren der Ebene n können jeweils zu einem Indikator der Ebene n-1 aggregiert werden. Somit können die Informationen nach entsprechender Normierung sukzessive von Ebene 4 (Basisebene) auf eine einzige Kennzahl auf Ebene 0 (Gesamtindikator) verdichtet werden. Da aber eine einzige Kennzahl der Vielfältigkeit der untersuchten Problemstellung nicht gerecht wird, werden auch untergeordnete Ebenen bzw. Teilbewertungen in der Bewertung explizit analysiert. Wird auf die Normierung verzichtet, so ist auf Basisebene auch ein Abgleich mit exogenen Referenzwerten möglich.

In die Berechnung der Indikatoren auf Ebene 4, die sich zeitlich auf den gesamten *Betrachtungszeitraum (2006 bis 2030)* und räumlich auf ganz *Deutschland (Bund)* beziehen, gehen Modellzwischenergebnisse in unterschiedlichen räumlichen sowie zeitlichen Auflösungen ein. Entsprechende räumliche und zeitliche Aggregationen werden durchgeführt. Diesbezüglich werden drei räumlich-zeitliche Typen der Indikatoren auf Ebene 4 unterschieden. Durch dieses Vorgehen kann bei der Bewertung berücksichtigt werden, dass bspw. Luftschadstoffemissionen, die lokal wirken, in bestimmten Regionen oder Gemeinden weit über dem räumlichen Mittelwert für Deutschland liegen. Außer-

⁶⁵ Die Nachhaltigkeitsbewertung wird durch den Betrachtungsgegenstand von *AWOHM*, d. h. den Gebäude- und Haushaltsbestand, und die mit *AWOHM* bereitstellbaren Informationen eingeschränkt, sodass jeweils nur Teilaspekte der Nachhaltigkeit bzw. ihrer Dimensionen und Kriterien abgedeckt werden (können).

dem können bspw. auch zeitliche Maxima oder Quantile von Emissionen in die Bewertung einfließen.

(4) Multivariate Analyse⁶⁶

Die Bewertung von Bündeln umweltpolitischer Instrumente anhand eines definierten Satzes von Indikatoren kann durch multivariate Analysen der auf Mikroebene vorliegenden Modellergebnisse ergänzt werden. Dabei können durch Clusteranalysen⁶⁷ homogene Gruppen von Haushalten oder Gebäuden mit vielversprechenden Minderungspotenzialen oder finanzieller Überforderung identifiziert werden. Speziell für derartige Gruppen können dann umweltpolitische Instrumente entwickelt oder bestehende angepasst werden. Diese Form der Auswertung orientiert sich im Gegensatz zu den vorgegebenen Indikatoren stark an den Modellergebnissen und ihren quantitativen Zusammenhängen. Neben der datengetriebenen Identifizierung zusätzlicher Bewertungsaspekte zielt sie insbesondere auf eine potenzial- und hemmnisgetriebene Umgestaltung der umweltpolitischen Instrumentenbündel ab.

(5) Unsicherheitsanalyse⁶⁸

Die Ergebnisse des entwickelten Modells weisen Unsicherheiten auf, die im Rahmen einer Unsicherheitsanalyse bei der Ergebnisinterpretation berücksichtigt werden. In *AWOHM* wird durch die Kombination existierender Datensätze gezielt die Datenbasis verbreitert. Dies ist notwendig, um die Modellierung auf Mikroebene und mit einer hohen räumlichen Auflösung zu ermöglichen. Das entwickelte Modell *AWOHM* ist somit ein Kompromiss zwischen vollständiger Anpassung an die Datenlage und einer Modellstruktur, welche die Berechnung möglichst interpretierbarer Ergebnisse ermöglicht, die häufig mehr Daten erfordern als zur Verfügung stehen. Um die Datenkombination

⁶⁶ Eine ausführliche Beschreibung findet sich in Abschnitt 6.2.

⁶⁷ Der Begriff der Clusteranalyse repräsentiert diverse Verfahren zur Bündelung von Objekten (Backhaus u. a. 2003).

⁶⁸ Eine ausführliche Beschreibung findet sich in Abschnitt 5.6.2.

umzusetzen bzw. die durch diese in das Modell eingebrachte Unsicherheit berücksichtigen zu können, werden neben deterministischen („ohne Zufallsvariablen“) auch nicht-deterministische („mit Zufallsvariablen“) Berechnungsvorschriften verwendet. Letztere werden eingesetzt, wenn bspw. ein plausibler Modelldatensatz (auf Mikroebene) erstellt werden muss, obwohl nur Informationen über die Verteilung bestimmter Eigenschaftsausprägungen in einer Menge vorliegen. Ein plausibler Modelldatensatz kann dann durch Zufallsziehung aus der entsprechenden Verteilung erstellt werden, was überwiegend bei der Zuordnung von Gebäudetypen, Anlagentechnik und der Qualität der Gebäudehüllenelemente zu konkreten Haushalten oder Gebäuden Anwendung findet. Die dadurch verursachte Streuung der Modellergebnisse wird durch die Variation unsicherer Parameter in Szenarien mittels *Monte-Carlo*-Simulation analysiert (vgl. *Realisationen von Zufallsvariablen* im bereits erläuterten Abschnitt (1) Szenario). Zudem erfolgt ein Abgleich der Modellergebnisse und Zwischenergebnisse mit exogenen Daten auf unterschiedlichen räumlichen Ebenen, um die Gesamtunsicherheit bzw. Modellgüte abschätzen zu können. Bei der Unsicherheitsanalyse wird gezielt ein Schwerpunkt auf die Erstellung des Startbestands des Jahres 2006 gesetzt, da dieser Voraussetzung für eine Unsicherheitsanalyse der Dynamik des betrachteten Systems in den Jahren 2007 bis 2030 ist. Dabei stehen insbesondere die durch die Kombination der Datensätze ins Modell eingebrachten Unsicherheiten im Vordergrund, die zur Modellierung auf Mikroebene und auf unterschiedlichen räumlichen Ebenen erforderlich war. Nicht-deterministische Berechnungsvorschriften kommen allerdings auch bei der Simulation der Dynamik des Haushalts- und Gebäudebestands zum Einsatz, bspw. in Form von Sterbe- und Umzugswahrscheinlichkeiten und bei der Zuordnung von Entscheidertypen oder -strategien zu konkreten Gebäuden oder Haushalten.⁶⁹

⁶⁹ Prinzipiell zeigte die Anwendung von *AWOHM*, dass aggregierte Modellergebnisse trotz nicht-deterministischer Modellelemente konsistent reproduzierbar sind.

(6) Erkenntnisse⁷⁰

Die Erkenntnisse der Anwendung von *AWOHM* richten sich primär an Exekutive, Legislative und Förderer im Bereich der energetischen Modernisierung von Wohngebäuden. Sie können allerdings auch für weitere Akteure wie Unternehmen der Wohnungswirtschaft und Produkthersteller von Interesse sein. Die Erkenntnisse beziehen sich auf die Auswirkungen sowie die adäquate Bündelung und Ausgestaltung umweltpolitischer Instrumente wie der Energieeinsparverordnung, von Förderprogrammen und von Informationskampagnen. Bei der direkten Übertragung der Ergebnisse in die Praxis müssen jedoch Annahmen und Daten des jeweiligen Teilbereichs verifiziert werden.

5.3 Integrierte Abbildung von Wohngebäude- und Haushaltsbestand sowie Ermittlung des Startbestands

In diesem Abschnitt wird auf die integrierte Abbildung von Wohngebäude- und Haushaltsbestand (in Abgrenzung zur Bestandsentwicklung) sowie die Ermittlung des Startbestands im Jahr 2006 eingegangen. Die aktorsbasierte Modellierung der Bestandsentwicklung wird für Gebäude in Abschnitten 5.4 und für Haushalte in Abschnitt 5.5 beschrieben.

Grundgedanke des Modellaufbaus ist die integrierte Abbildung von Gebäudehülle, Anlagentechnik und Bewohner bzw. Eigentümer in einem Bestandsmodell. Hierfür kann entweder ein *typologiebasierter*⁷¹ oder ein *individualebenenbasierter*⁷² Ansatz verfolgt werden (Swan & Ugursal 2009)⁷³. Bei einem *individualebenenbasierten* Ansatz werden Gebäude, Wohnung, Anlagentechnik und Bewohner bzw. Eigentümer samt ihrer Beziehungen und Charakteris-

⁷⁰ Die Anwendung von *AWOHM* und entsprechende Schlussfolgerungen finden sich in den Kapiteln 7 und 8.

⁷¹ Vgl. Archetypen (*Archetypes*) bei Swan & Ugursal (2009).

⁷² Vgl. Stichproben (*Sample*) bei Swan & Ugursal (2009).

⁷³ Swan & Ugursal (2009) betrachten allerdings nur Gebäude und keine Bewohner bzw. Eigentümer.

tika auf Mikroebene, d. h. auf individueller Ebene, modelliert. Bei einem *typologiebasierten* Ansatz werden „fiktive“ Gebäude- und Haushaltstypen bspw. anhand von Größe und Alter definiert, über Mittelwerte oder als typisch angenommene Werte charakterisiert und die Häufigkeit jedes Typs angegeben. Sofern keine Vollerhebung durchgeführt wurde, sind Angaben über Häufigkeiten bzw. Hochrechnungsfaktoren zwar auch bei *individualebenenbasierten* Ansätzen notwendig. Der Differenzierungsgrad ist allerdings bei *individual-ebenenbasierten* Ansätzen tendenziell höher als bei *typologiebasierten* Ansätzen.

Die Verwendung von Typologien reduziert einerseits die Datenanforderungen sowie die Rechenzeit von Simulationen oder Optimierungen. Andererseits werden Abhängigkeiten zwischen Daten eliminiert, bevor die Modellergebnisse und damit die Auswirkungen der Abhängigkeiten auf die Modellergebnisse analysiert wurden. Aufgrund der durch die Heterogenität des Gebäude- und Haushaltsbestands (vgl. Kapitel 2 und 4) bedingten Vielzahl möglicher Kombinationen zur Spezifikation von Gebäuden und Haushalten würde eine für die Beantwortung der Haupt- und Teilforschungsfragen geeignete, kombinierte Haushalts- und Gebäudetypologie eine Vielzahl an Typen erfordern. Dadurch schwände allerdings der Vorteil eines *typologiebasierten* Ansatzes. Bei hinreichender Datenverfügbarkeit und vertretbarer Rechenzeit für nachfolgende Schritte dominiert ein Ansatz auf Mikroebene mit etwaiger Typenbildung nach den Modellläufen einen *typologiebasierten* Ansatz mit Typenbildung vor den Simulationsläufen.

In Anbetracht der Datenverfügbarkeit und der Modellanforderungen (vgl. Abschnitt 5.1) wird im Folgenden als Kompromiss ein um Typologieelemente ergänzter Ansatz auf Mikroebene verfolgt. Als zentrale Datenquelle dient dabei das *Scientific-Use-File* (SUF) des Mikrozensus 2006 (vgl. Statistisches Bundesamt 2008c), das multivariate Datensätze für 0,7% der Haushalte in Deutschland umfasst. Dadurch stehen Stammdaten zum Gebäude (Baualter, Wohnungsanzahl), zu den Wohnungen (Wohnfläche, Mieten, Nebenkosten, Eigen-

tumsverhältnisse), zu Anlagentechnik und Verrohrung (Energieträger, Zentralität), zu Bewohnern bzw. teilweise Eigentümern (Alter, Haushaltsgröße, Einkommen, Bildungsgrad etc.) sowie eine räumliche Differenzierung nach Bundesland und Gemeindegrößenklasse auf Mikroebene zur Verfügung. Zur Hochrechnung der Stichprobe auf Deutschland können an Eckwerte des Wohngebäude- und Bevölkerungsbestands angepasste Hochrechnungsfaktoren des SUF 2006 herangezogen werden. Die auf Mikroebene, d. h. für konkrete Haushalte, Wohnungen und Gebäude vorliegenden Daten des SUF 2006 müssen jedoch mit weiteren, teilweise auf Typologien basierenden Daten verknüpft werden, damit bspw. Aussagen hinsichtlich Energiebedarf/-verbrauch, energiebedingten Emissionen und der Wirtschaftlichkeit energetischer Modernisierungen getroffen werden können. Diese wiederum benötigt man, um die Wirkung umweltpolitischer Instrumente flexibel abbilden sowie ökonomische, ökologische und soziale Auswirkungen für eine nachhaltigkeitsorientierte Bewertung quantifizieren zu können (vgl. Modellanforderungen in Abschnitt 5.1).

In Abschnitt 5.3.1 wird auf die Modelldatenstruktur zur integrierten Abbildung von Gebäuden, Anlagentechnik, Bewohnern bzw. Eigentümern und die verwendeten Datenquellen eingegangen. Anschließend werden in den Abschnitten 5.3.2 bis 5.3.12 die einzelnen Elemente der Datenstruktur sowie die Ermittlung des Startbestands für das Jahr 2006 im Detail erläutert, bevor in Abschnitt 5.3.13 auf die Hauptdatenquelle, den Mikrozensus, eingegangen wird.

5.3.1 Modelldatenstruktur und Datenquellen

Der Zusammenhang zwischen der Mikrozensusdatensatzstruktur (vgl. Abschnitt 2.2.1) sowie weiteren Hauptdatenquellen und der Modelldatenstruktur ist vereinfacht in Abbildung 11 dargestellt. Essenziell ist, dass der Mikrozensus auf Haushaltsebene Daten zu Gebäuden und Technik in Verbindung mit Daten zu Bewohnern bzw. Eigentümern enthält. Diese werden, angereichert mit Informationen aus weiteren Hauptdatenquellen, in die Modelldatenstruktur übernommen. Somit können Gebäude, Anlagentechnik und Bewohner inte-

griert betrachtet werden. Zudem können Modellergebnisse, die während der Modellläufe berechnet werden, diesen Haushaltsdatensätzen zugeordnet werden.

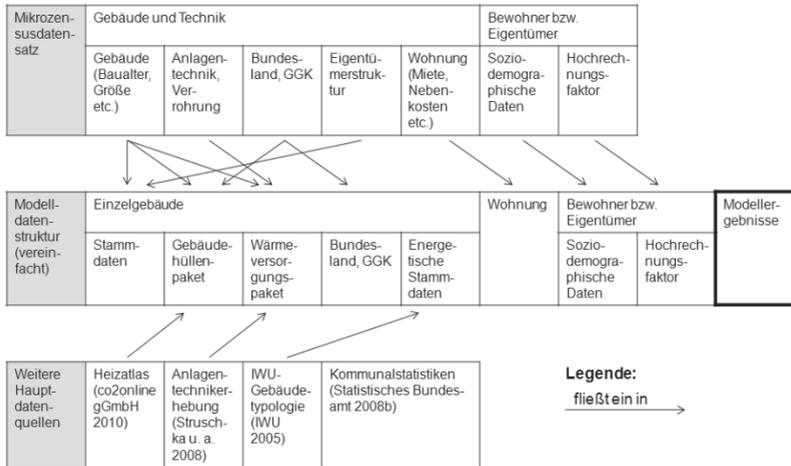


Abbildung 11: Zusammenhang zwischen Mikrozensusdatensatz, Modelldatenstruktur und weiteren Hauptdatenquellen; GGK: Gemeindegrößenklasse

Im Mikrozensus stehen prinzipiell zu jedem Gebäude sozio-demographische Daten der Bewohner zur Verfügung. Hinsichtlich der Eigentümer hängt die Datenlage jedoch von der Eigentümerstruktur ab (vgl. Tabelle 14). Bei selbstnutzenden Eigentümern und privaten Vermietern mit teils selbstgenutzten Gebäuden stehen zu jedem Gebäude sozio-demographische Merkmale zu den Eigentümern zur Verfügung. Dahingegen liegen bei privaten Vermietern mit vollständig vermieteten Gebäuden zwar sozio-demographische Daten über die Eigentümer vor. Diese können jedoch nicht direkt den Gebäuden zugeordnet werden. Zu institutionellen Vermietern gibt es im Mikrozensus keinerlei Angaben, sodass auf andere Datenquellen zurückgegriffen werden muss (vgl. Kapitel 4). Insgesamt haben die Daten des Mikrozensus in den Erhebungsjahren 2006 und 2010 eine ähnliche Struktur (vgl. Statistisches Bundesamt 2008c; Statistische Ämter des Bundes und der Länder 2010). Die Daten des umfang-

reicheren Zensus 2011 bieten hinsichtlich der (institutionellen) Vermieter eine bessere Datenlage (vgl. Statistische Ämter des Bundes und der Länder 2011). Das *Scientific-Use-File* des Mikrozensus 2010 sowie der Zensus 2011 waren erst kurz vor Abschluss dieser Arbeit verfügbar und wurden daher in dieser Arbeit nicht detailliert berücksichtigt.

Tabelle 14: Datenlage in Mikrozensus und Zensus differenziert nach Eigentümerstrukturen (auf Basis von: Statistisches Bundesamt 2008c; Statistische Ämter des Bundes und der Länder 2010; 2011)

X → abgedeckt (X) → abgedeckt, aber ohne Verbindung zum Gebäude „-“ → nicht abgedeckt		Eigentümerstruktur				
		Rein selbstnutzender Eigentümer	Selbstnutzende Eigentümergemeinschaft	Privater Vermieter mit teils selbstgenutztem Gebäude	Privater Vermieter mit vollständig vermieteten Gebäuden	Institutioneller Vermieter
Mikrozensus 2006 und 2010	Sozio-demographische Merkmale der Bewohner	X	X	X	X	X
	Sozio-demographische Merkmale der Eigentümer	X	X	X	(X)	-
Zensus 2011	Merkmale zu Gebäude und Eigentümerstruktur	X	X	X	X	X

Die zur Abbildung des Bestands in einem Jahr t entwickelte Modelldatenstruktur entspricht einem relationalen Datenmodell. Dieses ist auszugsweise in Abbildung 12 dargestellt und umfasst Klassen mit jeweils mehreren Attributen sowie Beziehungen zwischen den Klassen. Die Modelldatenstruktur bildet die Grundlage für die Modellierung der Dynamik von Gebäude- und Haushaltsbestand sowie die Berechnung von Kennwerten wie bspw. Energiebedarf sowie Treibhausgas- und Luftschadstoffemissionen.

Auf Mikroebene werden *Bewohner (Haushalte)* modelliert. Diese bewohnen Wohnungen, die zu (Einzel-)Gebäuden gehören. Ein *Einzelgebäude* besitzt ein *Hüllenpaket* und ein *Wärmeversorgungspaket*, das aus einem oder mehreren *Wärmeerzeugern*, *Energieträgerverfügbarkeiten* sowie *Verrohrungen/Speichern* besteht und die Wärmeversorgung gewährleistet. *Deutschland* besteht aus mehreren *Bundesländern*, die mehrere *Einzelgebäude* und *Kreise*, die sich wiederum aus *Gemeinden* zusammensetzen, umfassen. Die bisher erwähnten

Klassen werden auf Mikroebene modelliert. Instanzen dieser Klassen verweisen (per Fremdschlüssel) auf Typen, d. h. Bestandteile von Typologien. Ein *Einzelgebäude* verweist auf *energetische Stammdaten*, wie Wand- und Dachflächen, die zu einer energiebezogenen Gebäudetypologie (der IWU-Gebäudetypologie, vgl. Kapitel 2) gehören. Ein *Hüllenpaket* verweist auf Typen von *oberen Gebäudeabschlüssen*, *Fenstern*, *Außenwänden* und *unteren Gebäudeabschlüssen*. Neben wirtschaftlichen Kennwerten sind bei diesen Bauteilen überwiegend Wärmedurchgangskoeffizienten hinterlegt. Diese Typenverweise können sich in *AWOHM*, im Gegensatz zu den *energetischen Stammdaten*, bei einer energetischen Modernisierung verändern. Ein *Wärmeerzeuger* verweist auf *Stammdaten Wärmeerzeuger*, d. h. einen Wärmeerzeugertyp, der wiederum auf den Typ eines *Energieträgers* verweist. Analoges gilt für *Energieträgerverfügbarkeiten* sowie *Verrohrungen/Speicher*.

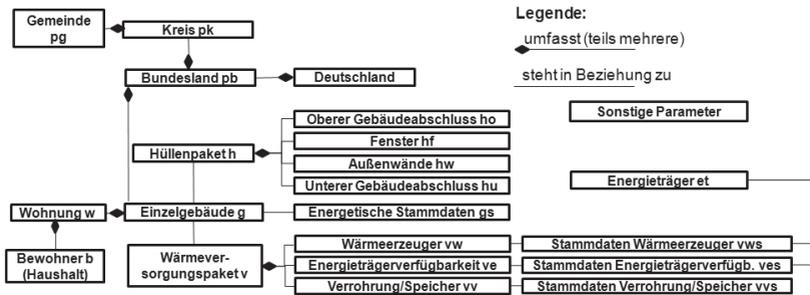


Abbildung 12: Modelldatenstruktur zur integrierten Abbildung von Gebäudehülle, Anlagentechnik und Bewohner

Die im Folgenden verwendeten Bezeichnungen für die erwähnten Klassen bzw. deren Instanzen seien:

- $b \in B$ *Bewohner (Haushalte)*
- $w \in W$ *Wohnung*
- $g \in G$ *Einzelgebäude*
- $gs \in GS$ *Energetische Stammdaten*
- $h \in H$ *Hüllenpaket*

$ho \in HO$	<i>Oberer Gebäudeabschluss</i>
$hf \in HF$	<i>Fenster</i>
$hw \in HW$	<i>Außenwände</i>
$hu \in HU$	<i>Unterer Gebäudeabschluss</i>
$v \in V$	<i>Wärmeversorgungspaket</i>
$vw \in VW$	<i>Wärmeerzeuger</i>
$vws \in VWS$	<i>Stammdaten Wärmeerzeuger</i>
$ve \in VE$	<i>Energieträgerverfügbarkeit</i>
$ves \in VES$	<i>Stammdaten Energieträgerverfügbarkeit</i>
$vv \in VV$	<i>Verrohrung und Speicher</i>
$vvs \in VVS$	<i>Stammdaten Verrohrung und Speicher</i>
$et \in ET$	<i>Energieträger</i>
$pb \in PB$	<i>Bundesland</i>
$pk \in PK$	<i>Kreis</i>
$pg \in PG$	<i>Gemeinde</i>

Als Ausgangszustand für die Simulation der Wohngebäude- und Haushaltsbestandsveränderung wurde der Bestand im Jahr 2006 gewählt, da dieses dem Erhebungsjahr des verwendeten Mikrozensus 2006 entspricht. In den folgenden Abschnitten wird erläutert, wie der Startbestand der Simulation im Jahr 2006 auf Basis des *Scientific-Use-File* des Mikrozensus 2006 und weiterer Datenquellen abgeleitet wird. Dabei wird einerseits auf die Datenherkunft und -verwendung sowie andererseits auf die zur Harmonisierung der unterschiedlichen Datenformate angewendeten Methoden eingegangen. Tabelle 15 gibt einen Überblick über Datenherkunft und -verwendung bei der Ermittlung des Startbestands im Jahr 2006. Dabei wird zwischen Haupt- und den wichtigsten Nebendatenquellen (in der Übersicht sind nicht alle Nebendatenquellen aufgeführt) unterschieden. Zudem wird angegeben, welche Instanzen im Rahmen der Simulation verändert werden. Das konkrete Vorgehen für die Ermittlung der einzelnen Instanzen wird im Folgenden beschrieben, bevor auf die Model-

lierung der Veränderung des Startbestands von Wohngebäuden und Haushalten eingegangen wird.

Tabelle 15: Übersicht über Datenherkunft und -verwendung bei der Ermittlung des Startbestands im Jahr 2006; H: Hauptdatenquelle; N: Nebendatenquelle; WSchV: Wärmeschutzverordnung (nicht alle Nebendatenquellen sind aufgeführt)

Datenverwendung	Datenherkunft									
	Scientific-Use-Files des Mikrozensus 2006 (Statistisches Bundesamt 2006c)	IWU-Gebäudetypologie (IWU 2005)	HeizAtlas (co2online gGmbH 2010)	Anlagentechnikerhebung (Struschka u. a. 2008)	Kommunalstatistiken (Statistisches Bundesamt 2008b)	DIN 4108, WSchV78/82, WSchV95, EnEV02/07/09	BKI (2010)	Handbuch der Gebäudetechnik (Pistohl 2000)	Kosten technischer Gebäudeausrüstung (Staatliche Vermögens- und Hochbauverwaltung Baden-Württemberg 2006)	Modellergebnis
Bewohner	H	-	-	-	-	-	-	-	-	H
Wohnung	H	-	-	-	-	-	-	-	-	H
Einzelgebäude	H	N	N	N	-	-	-	-	-	H
Energetische Stammdaten	-	H	-	-	-	-	-	-	-	-
Hüllenpaket	H	H	H	-	-	-	-	-	-	H
Oberer Gebäudeabschluss	-	H	-	-	-	H	H	-	-	-
Fenster	-	H	-	-	-	H	H	-	-	-
Außenwände	-	H	-	-	-	H	H	-	-	-
Unterer Gebäudeabschluss	-	H	-	-	-	H	H	-	-	-
Wärmeversorgungspaket	-	-	-	-	-	-	-	-	-	H
Wärmeerzeuger	H	-	-	H	-	-	-	-	-	H
Stammdaten Wärmeerzeuger	N	-	-	H	-	-	-	H	H	-
Energieträgerverfügbarkeit	H	-	-	-	-	-	-	-	-	H
Stammdaten Energieträgerverfügbarkeit	N	-	-	-	-	-	-	-	H	-
Verrohrung und Speicher	H	-	-	-	-	-	-	-	-	H
Stammdaten Verrohrung und Speicher	N	-	-	-	-	-	-	-	H	-
Bundesland	-	-	-	-	H	-	-	-	-	-
Kreis	-	-	-	-	H	-	-	-	-	-
Gemeinde	-	-	-	-	H	-	-	-	-	-

5.3.2 Bewohner

Die Instanzen der Klasse *Bewohner (Haushalte)* werden wie diejenigen der zugehörigen *Wohnung* auf Basis des SUF 2006 erzeugt. Es wird jeweils nur der Haupteinkommensbezieher des ersten Haushalts einer Wohnung im Modell abgebildet. Damit ergeben sich 226.829 Datensätze. Attribute, Kürzel, Werte-

bereiche und Quellen je *Bewohner* sind in Tabelle 16 angegeben. Die ID (*Identifier*) kann beliebig gewählt werden, sofern sie eindeutig ist. Zu jedem *Bewohner* (*Haushalt*) wird eine zugehörige *Wohnung* erzeugt. Somit ist der Fremdschlüssel, d. h. die ID der zugehörigen *Wohnung* bzw. der Verweis auf diese bei der Erzeugung des Modelldatensatzes bekannt.

Tabelle 16: Attribute, Kürzel, Wertebereiche und Quellen je *Bewohner b*

Attribut	Kürzel	Wertebereich	Quelle
ID	b	Long	Beliebig, wenn eindeutig
Fremdschlüssel Wohnung	-	Long	Zugehörige Wohnung w
Hochrechnungsfaktor	HRF_b	Double	SUF 2006 – EF960
Anteil des Leerstands am Hochrechnungsfaktor	ALH_b	Double	Fachserie 5 - Statistisches Bundesamt (2006-2010); vgl. Tabelle 38
Haushaltsgröße	HG_b	Integer [Personen]	SUF 2006 – EF207 ⁴
Alter des Haupteinkommensbezieher	AL_b	Integer [a]	SUF 2006 – EF732
Bildungsgrad des Haupteinkommensbezieher	BG_b	1 (Ohne allgemeinen oder beruflichen Abschluss), 2 (Haupt-/Realschulabschluss), 3 (Hoch-/Fachhochschulreife), 4 (Lehrausbildung; berufsqualifizierender Abschluss an einer Berufsfachschule/Kollegschule; 1-jährige Schule des Gesundheitswesens), 5 (Hoch-/Fachhochschulreife und Lehrausbildung), 6 (Meister-/Techniker- oder gleichwertiger Fachschulabschluss), 7 (Fachhochschule, Hochschule), 8 (Promotion)	SUF 2006 – EF745
Haushaltsnettoeinkommen	EK_b	Double [€/Monat]	SUF 2006 – EF707
Eigentumsverhältnisse bez. Wohnung	-	1 (Eigentümer des Gebäudes), 2 (Eigentümer der Wohnung), 3 (Hauptmieter), 4 (Untermieter)	SUF 2006 – EF491
Geschlecht des Haupteinkommensbezieher	GH_b	Männlich, weiblich	SUF 2006 – EF731

Die Auswahl der Attribute orientiert sich an der Datenverfügbarkeit und ihrem Beitrag zur Erfüllung der Modellanforderungen. IDs und Fremdschlüssel sind notwendig, um die Struktur zwischen den Objekten, wie bspw. die Zusammenhänge von Gebäude, Anlagentechnik und Bewohner bzw. Eigentümer, darstellen zu können. Da es sich beim Mikrozensus um eine Stichprobe handelt, werden Hochrechnungsfaktoren benötigt, um die Modellergebnisse auf die Gesamtbevölkerung und den gesamten Gebäudebestand in Deutschland hoch-

⁷⁴ EF (Eingabefeld) und die jeweilige Nummerierung beziehen sich auf das Schlüsselverzeichnis des Mikrozensus 2006 (Statistisches Bundesamt 2008c).

rechnen zu können. Die über Hochrechnungsfaktoren bestimmten Bestände beinhalten teilweise leerstehende Wohnungen. Der Anteil des Leerstands am Hochrechnungsfaktor wird daher ebenfalls vorgehalten. Die Thematik wird im Detail in Abschnitt 5.3.13 behandelt.

Die Haushaltsgröße hat einen Einfluss auf den Warmwasserbedarf und den Elektrizitätsbedarf der Haushalte. Haushaltsgröße, Alter und Bildungsgrad des Haupteinkommensbeziehers sowie das Haushaltsnettoeinkommen stehen bei Selbstnutzern zudem im Zusammenhang mit der energetischen Sanierungsaktivität, die zudem auch maßgeblich von den Eigentumsverhältnissen beeinflusst wird (vgl. Kapitel 4). Insbesondere das Haushaltsnettoeinkommen ist zur Quantifizierung ökonomischer und sozialer Konsequenzen der energetischen Modernisierung bei Selbstnutzern und Mietern von Bedeutung. Es ermöglicht zudem eine detaillierte Abbildung des Instruments der steuerlichen Abzugsfähigkeit energetischer Modernisierungen bei Selbstnutzern. Bei einem Betrachtungszeitraum bis 2030 verändern sich neben den Wohnungs- und Gebäudeeigenschaften auch die Haushaltseigenschaften bzw. der Haushaltsbestand. Um die Dynamik der Haushalte, die wiederum die energetische Modernisierungsaktivität sowie die ökonomischen und sozialen Konsequenzen beeinflusst, abbilden zu können, sind die sozio-demographischen Merkmale ebenfalls relevant. Alter, Haushaltsgröße und Geschlecht bedingen bspw. Geburtswahrscheinlichkeiten, Umzugswahrscheinlichkeiten und Sterbewahrscheinlichkeiten (vgl. Abschnitt 5.5). Auch für die Identifizierung und Charakterisierung von Clustern bzw. Zielgruppen mit großen technischen und ökonomischen Potenzialen sowie für die Anpassung umweltpolitischer Instrumente an diese Zielgruppen (vgl. Modellanforderungen in Abschnitt 5.1) sind allgemeine sozio-demographische Merkmale von Interesse.

5.3.3 Wohnung

Die Instanzen der Klasse *Wohnung* werden auf Basis des SUF 2006 erzeugt. Für jeden *Bewohner (Haushalt)* wird dabei eine Wohnung erzeugt. Attribute, Kürzel, Wertebereiche und Quellen je *Wohnung* sind in Tabelle 17 angegeben.

Da die zugehörigen *Einzelgebäude* ebenfalls auf Basis des SUF 2006 erzeugt werden und bekannt ist, falls mehrere Wohnungen zum selben Gebäude gehören, ist der Fremdschlüssel zum zugehörigen *Einzelgebäude* bei der Erzeugung des Datensatzes bekannt. Die Fläche der gesamten Wohnung (einschl. Küche, Bad, Toilette, Flur, Mansarde, anrechenbarer Balkonfläche oder untervermieteter sowie gewerblich genutzter Räume)⁷⁵ wird für die Energiebedarfsberechnung auf Wohnungs- bzw. Haushaltsebene benötigt. Zudem geht die Summe der Flächen je Wohnung in die Energiebedarfsberechnung auf Gebäudeebene ein. Bei Mietwohnungen werden Kaltmiete und kalte Nebenkosten verwendet, um auf Haushaltsebene Miete und Nebenkosten mit dem Haushaltsnettoeinkommen vergleichen zu können. Hiermit lässt sich die soziale Dimension der Nachhaltigkeit bspw. durch die finanzielle Belastung einkommensschwacher Haushalte abbilden. Die Kaltmiete wird bei der Modellierung der Dynamik des Wohngebäudebestands durch die Modernisierungsumlage verändert. Die warmen Nebenkosten werden zwar modellendogen berechnet. Jedoch wird der im Rahmen des Mikrozensus von Mietern angegebene und im Modell vorgehaltene Betrag („Umlagen für den Betrieb einer Zentralheizung und Warmwasserversorgung, Strom, Gas, flüssige und feste Brennstoffe, Fernwärme“) zur Plausibilisierung bzw. zur Abschätzung der Unsicherheit der berechneten Größen verwendet. Dieses Vorgehen ist aufgrund der Datenlage allerdings nur bei vermieteten Wohnungen möglich.

Tabelle 17: Attribute, Kürzel, Wertebereiche und Quellen je *Wohnung w*

Attribut	Kürzel	Wertebereich	Quelle
ID	w	Long	Beliebig, wenn eindeutig
Fremdschlüssel Einzelgebäude	-	Long	Zugehöriges Einzelgebäude g
Fläche der gesamten Wohnung	A_w	Double [m ²]	SUF 2006 - EF492
Kaltmiete	KM_w	Double [€/Monat]	SUF 2006 - EF502
Kalte Nebenkosten	KNK_w	Double [€/Monat]	SUF 2006 - EF500
Warme Nebenkosten	WNK_w	Double [€/Monat]	SUF 2006 - EF501

⁷⁵ Im Folgenden wird die *Fläche der gesamten Wohnung* als Synonym zur *Wohnfläche* und zur *beheizten Wohnfläche* verwendet, da die verwendete Datenlage keine Unterscheidung zulässt. Der unbeheizte Anteil der Wohnfläche wird durch die Anpassung der mittleren Raumtemperatur berücksichtigt.

5.3.4 Einzelgebäude

Die Instanzen der Klasse *Einzelgebäude* werden auf Basis des SUF 2006 erzeugt. Attribute, Kürzel, Wertebereiche und Quellen je *Einzelgebäude* sind in Tabelle 18 angegeben. Anhand des Baujahrs des Gebäudes, der Anzahl der Wohneinheiten im Gebäude und des Bundeslands können die Gebäudetypen, d. h. die *energetischen Stammdaten*, denen ein *Einzelgebäude* zugeordnet werden kann, eingeschränkt werden. Im SUF 2006 sind allerdings keine Baujahre, sondern nur Baualtersklassen angegeben. Das Baujahr wird aus einer Wahrscheinlichkeitsverteilung gezogen, in der jedes Jahr der im Mikrozensus angegebenen Baualtersklasse dieselbe Wahrscheinlichkeit besitzt. Dies entspricht der Annahme konstanter Bautätigkeit innerhalb einer Baualtersklasse. Durch den Übergang von Baualtersklassen auf Baujahre kann eine eindeutige Zuordnung zu den Baualtersklassen der energetischen Gebäudetypologie erfolgen, die von denen des Mikrozensus abweichen. Zudem werden potenzielle vergangene oder zukünftige Sanierungsjahre auf Basis des Baujahrs abgeschätzt. Durch die Zufallsziehungen, die auch bei der Zuordnung der *energetischen Stammdaten*, der *Hüllenpakete*, der *Wärmeversorgungspakete* und der Eigentümerstruktur zu einem *Einzelgebäude* erfolgen, werden in das Modell Unsicherheiten eingebracht. Diese können quantifiziert werden, indem im Rahmen einer *Monte-Carlo*-Simulation die Schwankungsbreite der Modellergebnisse und Zwischenergebnisse analysiert wird. Dabei werden mehrere Modellläufe durchgeführt, bei denen jedes Mal erneut aus den Wahrscheinlichkeitsverteilungen gezogen wird.

Die konkrete Zuordnungsprozedur zwischen *Einzelgebäude* und *energetischen Stammdaten* wird, wie auch die Attribute der *energetischen Stammdaten*, im folgenden Abschnitt 5.3.5 beschrieben. Die dabei anfallenden Informationen werden auch für die Bestimmung von und die Verweise auf *Hüllenpaket* und *Wärmeversorgungspaket* des *Einzelgebäudes* herangezogen. Die entsprechenden Zuordnungsprozeduren werden in den Abschnitten 5.3.6 und 5.3.8 be-

geschrieben. Die Zuordnungsprozedur zwischen Einzelgebäude und Eigentümerstruktur wird in Abschnitt 5.4.4 erläutert.

Tabelle 18: Attribute, Kürzel, Wertebereiche und Quellen je *Einzelgebäude g*

Attribut	Kürzel	Wertebereich	Quelle	Methode
ID	g	Long	Beliebig, wenn eindeutig	-
Fremdschlüssel energetische Stammdaten	gs_g	Long	Zugehörige energetische Stammdaten gs	Siehe Abschnitt 5.3.5
Fremdschlüssel Hüllenpaket	hg	Long	Zugehöriges Hüllenpaket h	Siehe Abschnitt 5.3.6
Fremdschlüssel Wärmeverorgungspaket	vg	Long	Zugehöriges Wärmeverorgungspaket v	Siehe Abschnitt 5.3.8
Baujahr des Gebäudes	Bj_g	Integer [a]	SUF 2006 – EF494	Ziehung aus einer Gleichverteilung über die Baualtersklasse
Anzahl der Wohneinheiten im Gebäude	-	Integer [Wohneinheiten]	SUF 2006 – EF635 und EF490	Kombination erlaubt höchste Differenzierung
Eigentümerstruktur	-	A (Rein selbstnutzender Eigentümer), B (Selbstnutzende Eigentümergemeinschaft), C (Amateurvermieter mit teils selbstgenutztem Gebäude), D (Amateurvermieter mit vollständig vermietetem Gebäude), E (Professioneller oder institutioneller Vermieter)	SUF 2006 – EF491, Gebäudetyp (vgl. energetische Stammdaten), Annahmen des Autors	Siehe Abschnitt 5.4.4
Fläche der Wohnungen im Gebäude	A_g	Double [m ²]	SUF 2006 – EF492	Summe aller Wohnungen
Gemeindegroßenklasse ⁷⁶	pbk_g	1 (<5.000), 2 (5.000-19.999), 3 (20.000-99.999), 4 (100.000-499.999), 5 (≥500.000), 6 (<20.000), 7 (20.000-499.999) [Personen]	SUF 2006 – EF563	-
Fremdschlüssel Bundesland	pb_g	Long	Zugehöriges <i>Bundesland</i> pb über Abgleich von SUF 2006 – EF1 und Statistik lokal (Statistisches Bundesamt 2008b)	-
Investition in Gebäudehülle	-	Double [€]	Bei Startbestand 0	Jährliche Aktualisierung bei Modellierung (vgl. Abschnitt 5.4)
Investition in Wärmeverorgungspaket	-	Double [€]	Bei Startbestand 0	
Investition in Verrohrung und Energieträgerwechsel	-	Double [€]	Bei Startbestand 0	
Umlagefähige Investition	-	Double [€]	Bei Startbestand 0	

⁷⁶ Im SUF des Mikrozensus 2006 wurden u. a. beim Merkmal Gemeindegroßenklasse regional unterschiedliche Vergrößerungen vorgenommen, um die faktische Anonymität sicherzustellen (vgl. Statistisches Bundesamt 2008c, den Daten beigelegtete "Allgemeine Informationen zum Mikrozensus 2006").

Die Fläche der Wohnungen im Gebäude (vgl. Tabelle 18) berechnet sich als Summe der Flächen der dem Einzelgebäude zugeordneten Wohnungen. Sie spezifiziert zusätzlich zum Gebäudetyp die Größe des Gebäudes und geht in die Energiebedarfsberechnung auf Gebäudeebene ein. Gemeindegrößenklasse und Bundesland spezifizieren die geographische Lage des Gebäudes. Anhand dieser Attribute können die Modellergebnisse durch Kombination mit Kommunalstatistiken bis auf Gemeindeebene heruntergebrochen werden. Bei der Simulation der energetischen Modernisierung werden die Höhen getätigter Investitionen⁷⁷ in Gebäudehülle, Wärmeversorgungsapakete, Verrohrungen, Speicher und Energieträgerwechsel sowie (auf Mieter) umlagefähige Investitionen gespeichert. Diese werden im Jahr 2006 mit 0 initialisiert. Diese Attribute lassen sich auf Basis anderer im Modell vorgehaltener Daten berechnen. Sie werden jedoch aus Laufzeitgründen als Zwischenergebnisse redundant vorgehalten.

5.3.5 Energetische Stammdaten

Das aufgrund der umfangreichen Stichprobe von 0,7% aller Haushalte in Deutschland als zentrale Datenquelle verwendete *Scientific-Use-File* des Mikrozensus 2006 (vgl. Statistisches Bundesamt 2008c) basiert auf der Gebäudetypologie bzw. -einteilung des Statistischen Bundesamtes (vgl. Abschnitt 2.2.1). Wegen fehlender Angaben zu Bauteilflächen und Wärmedurchgangskoeffizienten der Gebäude kann diese Gebäudetypologie nicht direkt zur Bestimmung des Endenergiebedarfs für Raumwärme- und Warmwasserbereitstellung, der Auswirkungen verschiedener Energieeffizienzmaßnahmen und Anlagentechniken auf die erwähnten Größen sowie der notwendigen Investitionen angewendet werden.

⁷⁷ Hierbei werden jeweils die Mehrinvestitionen der Modernisierungsalternative im Vergleich zu einer Unterlassungsalternative angesetzt, die in dieser Arbeit als nicht-energetische Sanierung der Gebäudehülle und ggf. durch etwaige Reparaturen ermöglichte Weiternutzung des Wärmeversorgungsapakets über die angesetzte Lebensdauer hinaus definiert wird. Bei Wärmeversorgungsapaketen entsprechen die Mehrinvestitionen bei der Vernachlässigung von Reparaturkosten den Gesamtinvestitionen. Vgl. Abschnitt 5.4.3.2 (Ö2a) für eine detaillierte Erläuterung.

Tabelle 19: Attribute, Kürzel, Wertebereiche und Quellen der *energetischen Stammdaten* *gs* (vgl. Abschnitt 2.2.2; Instanzen der Klasse finden sich in Tabelle 132 in Anhang A.1)

Attribut	Kürzel	Wertebereich	Quelle
ID	<i>gs</i>	Long	Beliebig, wenn eindeutig
Kürzel	-	1 (RH_B), 2 (RH_C), ..., (46) HH_NBL_G	
Gebäudetyp	-	RH, EFH, MFH, GMH, HH	IWU-Gebäudetypologie (vgl. IWU 2005)
Baualtersklasse ⁷⁸	-	Vor 1918, 1900-1918, 1919-1948, 1946-1960, 1949-1957, 1958-1968, 1969-1978, 1970-1980, 1979-1983, 1981-1985, 1984-1994, 1986-1990, 1995-2001, 2002-2006, 2007-2030 [a]	
Anzahl Vollgeschosse	-	Integer [Geschosse]	
Anzahl Wohneinheiten	-	Integer [Wohneinheiten]	
Beheizte Wohnfläche	A_{gs}	Double [m ²]	
Beheiztes Gebäudevolumen nach EnEV	V_{gs}	Double [m ³]	
Mittlere lichte Raumhöhe	-	Double [m]	
Wohnfläche pro Wohneinheit	-	Double [m ²]	
Bauteilfläche oberer Gebäudeabschluss	AO_{gs}	Double [m ²]	
Bauteilfläche unterer Gebäudeabschluss	AU_{gs}	Double [m ²]	
Bauteilfläche Außenwände	AW_{gs}	Double [m ²]	
Zusätzliche Bauteilfläche oberer Gebäudeabschluss	-	Double [m ²]	
Zusätzliche Bauteilfläche unterer Gebäudeabschluss	-	Double [m ²]	
Zusätzliche Bauteilfläche Außenwände	-	Double [m ²]	
Sonstige Bauteilflächen	-	Double [m ²]	
Transparente Bauteilflächen Süd	AFS_{gs}	Double [m ²]	
Transparente Bauteilflächen West/Ost	$AFWO_{gs}$	Double [m ²]	
Transparente Bauteilflächen Nord	AFN_{gs}	Double [m ²]	
Sonstige transparente Bauteilflächen	-	Double [m ²]	
Reduktionsfaktor für transparente Bauteilflächen	RT_{gs}	Double [-]	
Grundrisstyp	-	1 (Kompakt), 2 (Gestreckt)	
Anbausituation	-	0 (Freistehend), 1 (Einseitig angebaut), 2 (Zweiseitig angebaut)	
Kellergeschosstyp	-	1 (Nicht unterkellert), 2 (Keller nicht beheizt), 3 (Keller teilweise beheizt), 4 (Keller voll beheizt)	
Dachgeschosstyp	-	1 (Flachdach), 2 (Dachgeschoss nicht beheizt), 3 (Dachgeschoss teilweise beheizt), 4 (Dachgeschoss voll beheizt)	
Gauben	-	0 (Keine Gauben vorhanden), 1 (Gauben vorhanden)	

Für den Zweck der energetischen Analyse stellt die IWU-Gebäudetypologie (vgl. IWU 2005) wesentliche Informationen bereit (vgl. Abschnitt 2.2.2). Da zu den zugehörigen veröffentlichten Wohnflächen der diversen IWU-Gebäudetypvertreter (vgl. IWU 2007) keine Informationen über Anlagentechnik und Be-

⁷⁸ Die Baualtersklassen in den alten und neuen Bundesländern weichen teilweise voneinander ab, weshalb sich manche Baualtersklassen überlappen.

wohner der Gebäude und auch keine räumliche Differenzierung zur Verfügung stehen, ist eine Zuordnung der Gebäudetypen des Mikrozensus zu den Typvertretern der IWU-Gebäudetypologie notwendig. Dadurch sind die Nutzenergiebedarfe berechenbar, den Bewohnern zuordenbar und bei Anreicherung der Anlagentechnikangaben des Mikrozensus mit weiteren Parametern auch umrechenbar in Endenergiebedarf, Luftschadstoff- und Treibhausgasemissionen, Primärenergiebedarf sowie Energiekosten. Die *energetischen Stammdaten* werden auf Basis der IWU-Gebäudetypologie (vgl. IWU 2005) erzeugt und enthalten Parameter, die für die Energiebedarfsberechnung relevant sind. Attribute, Kürzel, Wertebereiche und Quellen der *energetischen Stammdaten* sind in Tabelle 19 angegeben. Sie umfassen zur Bestimmung der Transmissionswärmeverluste Bauteilflächen und zusätzliche Bauteilflächen für obere und untere Gebäudeabschlüsse, Außenwände und transparente Bauteilflächen. Für transparente Bauteile sind zudem Ausrichtung (Süd, West/Ost, Nord, Sonstiges) und Reduktionsfaktoren relevant, um solare Gewinne abschätzen zu können. Angaben zum Grundriss, Anbausituation, Keller- und Dachgeschossstyp sowie Gauben dienen der Plausibilisierung und Interpretation der Berechnung der Transmissionswärmeverluste. Für die Abschätzung der Lüftungsverluste wird das beheizte Gebäudevolumen nach EnEV herangezogen, für die inneren Wärmegewinne die beheizte Wohnfläche. Da die Flächen der Wohnungen im Gebäude eines *Einzelgebäudes* nicht der beheizten Wohnfläche der *energetischen Stammdaten* entsprechen, werden die entsprechenden Bauteilflächen des Typgebäudes für die Energiebedarfsberechnung und die Investitionsschätzung in Bezug auf die *Einzelgebäude* proportional angepasst.⁷⁹ Die Attribute Gebäudetyp und Baualtersklasse werden verwendet, um die *Einzelgebäude* den *energetischen Stammdaten* zuzuordnen. Die weiteren Attribute fließen nicht direkt in die Berechnungen ein, unterstützen aber die Ergebnisinterpre-

⁷⁹ Alternativ könnten auch komplexere, nicht-lineare Ansätze verwendet werden oder die Anpassung über die Anzahl der Wohneinheiten erfolgen. Um zu überprüfen, welcher Ansatz die belastbarsten Ergebnisse liefert, müssten allerdings entsprechende Daten zur Verfügung stehen.

tation. Im Folgenden wird die Zuordnung zwischen einem *Einzelgebäude* und den *energetischen Stammdaten* beschrieben. Diese spiegelt sich im Fremdschlüssel energetische Stammdaten der *Einzelgebäude* wider.

Transformation der Gebäudetypologien

Bei Stengel u. a. (2012) erfolgte die Modellierung mittels Gebäude- und (in Ansätzen) Haushaltstypen *typologiebasiert*. Bei dem hier primär verfolgten *individualebenenbasierten* Ansatz liegt der Fokus hingegen auf der Mikroebene. Ist ein aus der Wahrscheinlichkeitsverteilung gezogenes Baujahr eines *Einzelgebäudes* auf Mikroebene bekannt, so ist auch bei Kenntnis der Ausprägung des vom Statistischen Bundesamt verwendeten Merkmals *Anzahl Wohneinheiten* eine eindeutige Zuordnung zu den IWU-Gebäudetypen nicht in allen Fällen möglich. Einerseits müssen Anteile von Fachwerkbauten für bis 1918 errichtete EFH und MFH, über die der Mikrozensus 2006 keine Informationen zur Verfügung stellt, noch berücksichtigt werden. Dies wird in *AWOHM* durch Aufteilungsfaktoren, die Zuordnungswahrscheinlichkeiten entsprechen, abgebildet. Andererseits werden auch Wahrscheinlichkeiten für die Zuordnung von Gebäuden mit 1 WE zu RH und EFH, mit 3-12 WE zu MFH und GMH sowie mit >21 WE zu HH und GMH verwendet, damit die hieraus resultierende Gebäudeverteilung den vom IWU veröffentlichten Daten (vgl. IWU 2007) strukturell gleicht. Die Zuordnungswahrscheinlichkeiten wurden dafür und auch bei den Anteilen von Fachwerkbauten entsprechend angepasst. Relative Abweichungen, die sich aufgrund von Unterschieden in der Datenbasis ergeben müssen, wurden gleichmäßig verteilt. Die derart abgeleiteten Wahrscheinlichkeiten für die Zuordnung eines *Einzelgebäudes* mit einer Kombination aus Baujahr (gezogen aus Wahrscheinlichkeitsverteilung) und Anzahl Wohneinheiten (SUF 2006 – EF635 und EF490) zu den IWU-Gebäudetypen sind für die alten Bundesländer (ohne Berlin) in Tabelle 20 angegeben. Insbesondere aufgrund von Sonderbauten (*Plattenbauten*) ergeben sich für die neuen Bundesländer teils abweichende Gebäudetypen bzw. Zuordnungswahrscheinlichkeiten (vgl. Tabelle 21). Die durch die Verwendung von Zuordnungswahrscheinlichkeiten in

den Startbestand des Jahres 2006 eingebrachten Unsicherheiten bzw. Ergebnisstreuungen werden mithilfe der *Monte-Carlo*-Simulation in Kapitel 7 analysiert.

Tabelle 20: Wahrscheinlichkeiten für die Zuordnung einer Kombination aus Baujahr (gezogen aus Wahrscheinlichkeitsverteilung) und Anzahl Wohneinheiten (SUF 2006 – EF635 und EF490) zu den IWU-Gebäudetypen für die alten Bundesländer (ohne Berlin) (in Anlehnung an: Stengel u. a. 2012); 100% falls keine Angabe (vgl. Abschnitt 2.2.2; EFH_A bezeichnet bspw. Fachwerkeinfamilienhäuser mit Baujahr bis (einschließlich) 1918)

Baujahr	Anzahl Wohneinheiten				
	1	2	3-12	13-20	≥21
Bis 1918	RH_B (Massivbau): 9%; EFH_B (Massivbau): 91%	EFH_A (Fachwerk): 33%; EFH_B (Massivbau): 67%	MFH_A (Fachwerk): 19%; GMH_B (Massivbau): 11%; MFH_B (Massivbau): 70%	GMH_B (Massivbau)	
	RH_C: 21%; EFH_C: 79%	EFH_C	GMH_C: 1%; MFH_C: 99%	GMH_C	
1948-1957	RH_D: 16%; EFH_D: 84%	EFH_D	GMH_D: 10%; MFH_D: 90%	GMH_D	
1958-1968	RH_E: 20%; EFH_E: 80%	EFH_E	GMH_E: 10%; MFH_E: 90%	GMH_E	GMH_E: 39%; HH_E: 61%
1969-1978	RH_F: 36%; EFH_F: 64%	EFH_F	GMH_F: 15%; MFH_F: 85%	GMH_F	GMH_F: 38%; HH_F: 62%
1979-1983	RH_G: 27%; EFH_G: 73%	EFH_G	MFH_G		
1984-1994	RH_H: 18%; EFH_H: 82%	EFH_H	MFH_H		
1995-2001	RH_I: 23%; EFH_I: 77%	EFH_I	MFH_I		
2002-2006	RH_J: 16%; EFH_J: 84%	EFH_J	MFH_J		

Tabelle 21: Wahrscheinlichkeiten für die Zuordnung einer Kombination aus Baujahr (gezogen aus Wahrscheinlichkeitsverteilung) und Anzahl Wohneinheiten (SUF 2006 – EF635 und EF490) zu den IWU-Gebäudetypen für die neuen Bundesländer (mit Berlin) (in Anlehnung an: Stengel u. a. 2012); 100% falls keine Angabe (vgl. Abschnitt 2.2.2; EFH_A bezeichnet bspw. Fachwerkeinfamilienhäuser mit Baujahr bis (einschließlich) 1918)

Baujahr	Anzahl Wohneinheiten				
	1	2	3-12	13-20	≥21
Bis 1918	RH_B (Massivbau): 9%; EFH_B (Massivbau): 91%	EFH_A (Fachwerk): 33%; EFH_B (Massivbau): 67%	MFH_A (Fachwerk): 19%; GMH_B (Massivbau): 11%; MFH_B (Massivbau): 70%	GMH_B (Massivbau)	
	RH_C: 21%; EFH_C: 79%	EFH_C	GMH_C: 1%; MFH_C: 99%	GMH_C	
1945-1948	RH_D: 16%; EFH_D: 84%	EFH_D	MFH_NBL_D		
1949-1957	RH_E: 20%; EFH_E: 80%	EFH_E	MFH_NBL_E		
1958-1960	RH_F: 36%; EFH_F: 64%	EFH_F	GMH_NBL_F	HH_NBL_F	
1970-1980	RH_G: 27%; EFH_G: 73%	EFH_G	GMH_NBL_G	HH_NBL_G	
1986-1990	RH_H: 18%; EFH_H: 82%	EFH_H	GMH_NBL_H		
1990-1994	RH_I: 23%; EFH_I: 77%	EFH_I	MFH_I		
1995-2001	RH_I: 23%; EFH_I: 77%	EFH_I	MFH_I		
2002-2006	RH_J: 16%; EFH_J: 84%	EFH_J	MFH_J		

Die *energetischen Stammdaten* umfassen Größen, die sich durch eine energetische Modernisierung nicht bzw. überwiegend nur geringfügig ändern. Hierzu zählen insbesondere Bauteilflächen. Sie ändern sich bei einer energetischen Sanierung, wie bspw. Wärmedurchgangskoeffizienten, die auch in der IWU-Gebäudetypologie (für den weitgehend nicht energetisch modernisierten Zustand bzw. den Urzustand) angegeben sind, werden im *Hüllenpaket* bzw. den untergeordneten Klassen abgebildet. Um beim Bestand unterschiedliche Sanierungszustände in der Vergangenheit und in der Zukunft sowie in letzterem Falle insbesondere auch die zugehörigen Investitionen berücksichtigen zu können, ist eine Erweiterung der nur nach Gebäudetypen und Baualtersklasse differenzierenden IWU-Gebäudetypologie um Sanierungsvarianten notwendig. Da dies aber nicht die *energetischen Stammdaten* betrifft, wird dies über das *Hüllenpaket* und das *Wärmeversorgungspaket* berücksichtigt und in den entsprechenden Abschnitten erläutert.

Um den Neubau ab 2007 berücksichtigen zu können, werden die Gebäudetypen RH_K, EFH_K und MFH_K (Baualtersklasse *2007-2030*) eingeführt, denen dieselben *energetischen Stammdaten* wie den Typen der Baualtersklasse *2002-2006* (RH_J, EFH_J, MFH_J) zugeordnet werden. Die höheren bzw. steigenden energetischen Anforderungen werden über das *Hüllenpaket* und das *Wärmeversorgungspaket* berücksichtigt.

5.3.6 Hüllenpaket

Attribute, Kürzel und Wertebereiche je *Hüllenpaket* sind mit den zugehörigen Quellen in Tabelle 22 angegeben. Der Fremdschlüssel des *Hüllenpakets* zu den *energetischen Stammdaten* ist der gleiche wie derjenige des *Einzelgebäudes*, das auf das *Hüllenpaket* verweist. Im ersten Schritt wird für jedes *Einzelgebäude* ein *Hüllenpaket* des Urzustands erzeugt. Die entsprechenden Attribute des *oberen Gebäudeabschlusses*, der *Fenster*, der *Außenwände* und des *unteren Gebäudeabschlusses* werden aus der IWU-Gebäudetypologie übernommen und somit die entsprechenden Instanzen erzeugt. Somit sind auch die Fremdschlüssel des Urzustand-*Hüllenpakets* auf *oberen Gebäudeabschluss*, *Fenster*,

Außenwände und *unteren Gebäudeabschluss* bekannt. Die jeweiligen Einbaujahre werden dem Gebäudebaujahr gleichgesetzt und die boolesche Variable *Im Urzustand* wird auf *Ja* gesetzt. Im zweiten Schritt wird überprüft, ob zwischen dem Gebäudebaujahr und dem Startjahr der Simulation (2006) die angesetzte (und in Szenarien variierte) Lebensdauer der Gebäudehülle mindestens einmal überschritten wurde und, falls ja, in welchem Jahr – dem potenziellen energetischen Sanierungsjahr. Falls sie mehrfach überschritten wurde, so wird der spätere Zeitpunkt gewählt. Wurde die Lebensdauer noch nicht überschritten, so entspricht das Urzustand-*Hüllenpaket* dem Hüllenpaket im Startjahr der Simulation. Wurde die Lebensdauer der Gebäudehülle überschritten, so wird im dritten Schritt anhand von (unabhängigen) Sanierungswahrscheinlichkeiten simuliert, ob bzw. welche Bauteile energetisch modernisiert wurden.

Tabelle 22: Attribute, Kürzel, Wertebereiche und Quellen je *Hüllenpaket h*

Attribut	Kürzel	Wertebereich	Quelle	Methode
ID	<i>h</i>	Long	Beliebig, wenn eindeutig	-
Fremdschlüssel energetische Stammdaten	-	Long	Zugehörige energetische Stammdaten <i>gs</i>	Abschnitt 5.3.6
Fremdschlüssel oberer Gebäudeabschluss	<i>ho_n</i>	Long	Zugehöriger oberer Gebäudeabschluss <i>ho</i>	
Fremdschlüssel Fenster	<i>hf_n</i>	Long	Zugehöriges Fenster <i>hf</i>	
Fremdschlüssel Außenwand	<i>hw_n</i>	Long	Zugehörige Außenwand <i>hw</i>	
Fremdschlüssel unterer Gebäudeabschluss	<i>hu_n</i>	Long	Zugehöriger unterer Gebäudeabschluss <i>hu</i>	
Einbaujahr ob. Gebäudeabschluss	-	Integer [a]	Abgeleitet vom Baujahr des Gebäudes	
Einbaujahr Fenster	-	Integer [a]	(<i>Einzelgebäude</i>), der Lebensdauer der	
Einbaujahr Außenwand	-	Integer [a]	Gebäudehülle (<i>sonstige Parameter</i>) und	
Einbaujahr unt. Gebäudeabschluss	-	Integer [a]	den Sanierungswahrscheinlichkeiten	
Fremdschlüssel vorheriges Hüllenpaket	-	Long	Zugehöriges vorhergehendes <i>h</i>	
Im Urzustand	-	Ja, nein	Abgeleitet vom Baujahr des Gebäudes (<i>Einzelgebäude</i>), der Lebensdauer der Gebäudehülle (<i>sonstige Parameter</i>) und den Sanierungswahrscheinlichkeiten	

Es wird angenommen, dass die Gebäudehülle, d. h. oberer Gebäudeabschluss, Fenster, Außenwände und unterer Gebäudeabschluss, alle 40 Jahre (in Anlehnung an BMVBW (2001))⁸⁰ saniert wurden, wobei diese Größe in Szenarien variiert wurde. Die zusätzlichen Bauteilflächen werden diesbezüglich nicht be-

⁸⁰ BMVBW steht für Bundesministerium für Verkehr, Bau- und Wohnungswesen.

rücksichtigt. Eine energetische Sanierung erfolgte in der Realität allerdings nur bei einem Teil dieser Gebäude bzw. einem Teil dieser Bauteile. Daher werden bauteilspezifische energetische Sanierungsraten bzw. Sanierungswahrscheinlichkeiten angenommen, die den Anteil der Gebäude bzw. Bauteile angeben, die bei der nach 40 Jahren anstehenden Sanierung energetisch saniert wurden. Bei dem gewählten Startjahr 2006 und einem Sanierungszyklus von 40 Jahren beziehen sich diese Wahrscheinlichkeiten auf Gebäude mit Baujahr bis 1966. Der Anteil von RH und EFH mit energetisch modernisierten Fenstern wird von Weiß & Dunkelberg (2010) für die Baualtersklasse bis 1968 auf 60-70% geschätzt. Davon ausgehend wurde in den Modellläufen für sämtliche Gebäudetypen in den alten Bundesländern (RH, EFH, MFH, GMH und HH) für die Baualtersklasse bis 1966 mit 75% ein etwas höherer Anteil angenommen. Grund hierfür war einerseits die abweichende Baujahresgrenze und andererseits eine Anpassung im Rahmen der Plausibilisierung der Modellergebnisse in Kapitel 7, insbesondere beim Abgleich mit Daten von Diefenbach u. a. (2010). Am häufigsten wurden in der Vergangenheit Fenster energetisch modernisiert bzw. erneuert. Die auf die Fenster bezogenen energetischen Modernisierungsraten von oberem Gebäudeabschluss, Außenwänden und unterem Gebäudeabschluss wurden, nach neuen und alten Bundesländern differenziert, aus dem Heizatlas (vgl. co2online gGmbH 2010) übernommen und sind in Tabelle 23 angegeben. Es wird angenommen, dass sich diese relativen Größen, die sich auf Baujahre bis 1990 beziehen, auf Baujahre bis 1966 übertragen lassen. Diese auf die Fenster bezogenen Größen werden mit dem von Weiß & Dunkelberg (2010) abgeleiteten 75%-Anteil von Gebäuden mit energetisch sanierten Fenstern in der Baualtersklasse bis 1966 in den alten Bundesländern kombiniert. Die sich dabei ergebenden Anteile energetisch modernisierter Gebäude, d. h. die Sanierungswahrscheinlichkeiten, sind ebenfalls in Tabelle 23 angegeben.

Für Nichtsonderbauten in den neuen Bundesländern mit Baujahr bis 1966 werden dieselben Anteile hinsichtlich energetischer Modernisierung angenommen wie in den alten Bundesländern. Der Anteil von MFH_NBL, GMH_NBL

und HH_NBL⁸¹ in den neuen Bundesländern mit energetisch modernisierten Fenstern wird auf Basis des Heizatlas (vgl. co2online gGmbH 2010) auf 70% für 2006 geschätzt. GMH_NBL und HH_NBL wurden erst ab 1970 gebaut und daher bis 2006 theoretisch bei einem Sanierungszyklus von 40 Jahren noch nicht saniert, wobei durch ein Sondersanierungsprogramm von 1995-2005 ein Großteil dieser Gebäude aufgrund mangelhafter Bauausführung vorzeitig saniert wurde (Stengel u. a. 2012). Daher wurde im Modell der Sanierungszyklus der Gebäudehülle für MFH_NBL, GMH_NBL und HH_NBL einmalig auf 25 Jahre gesetzt⁸². Die Sanierungswahrscheinlichkeiten von MFH_NBL, GMH_NBL und HH_NBL, die gemäß diesem Sanierungszyklus zur Sanierung anstanden, wurden im Modell derart gewählt, dass jeweils ein Anteil von Gebäuden mit modernisierten Fenstern von ca. 70% an allen Gebäuden dieser Typen erreicht wird. Das Verhältnis anderer energetischer Maßnahmen im Vergleich zu den modernisierten Fenstern wird aus Tabelle 23 übernommen.

Tabelle 23: Sanierungswahrscheinlichkeiten bzw. Anteil energetisch modernisierter Gebäude an den Gebäuden mit Baujahr bis 1990 bzw. 1966 differenziert nach Fenstern, oberem Gebäudeabschluss, Außenwänden und unterem Gebäudeabschluss (in Anlehnung an: Stengel u. a. 2012; Datengrundlage: co2online gGmbH 2010; Weiß & Dunkelberg 2010)

Anteil energetisch modernisierter Gebäude mit Baujahr bis 1990 bzw. 1966		Energetisch modernisierte Gebäudehüllenkomponenten			
		Fenster	Oberer Gebäudeabschluss	Außenwände	Unterer Gebäudeabschluss
Bezogen auf Gebäude mit energetisch modernisierten Fenstern	Neue Bundesländer (nur für Sonderbauten verwendet)	100%	62%	34%	14%
	Alte Bundesländer (für alle Nichtsonderbauten verwendet)	100%	78%	32%	15%
Bezogen auf Gebäude mit Baujahr bis 1966	Alte Bundesländer	75%	59%	24%	11%

Wurde mindestens ein Bauteil energetisch modernisiert, wird ein neues *Hüllenpaket* erzeugt. Dieses neue *Hüllenpaket* verweist per Fremdschlüssel auf das vorherige Urzustands-*Hüllenpaket*, zeigt für die energetisch modernisierten Bauteile das jeweilige Sanierungs- bzw. Einbaujahr auf und verweist per

⁸¹ Der Zusatz „_NBL“ nach dem Gebäudetyp kennzeichnet Sonderbauten in den neuen Bundesländern.

⁸² Anschließend wurde der Sanierungszyklus wieder auf 40 Jahre erhöht.

Fremdschlüssel auf die jeweiligen energetisch modernisierten bzw. Urzustands-Bauteile. Im Falle einer energetischen Sanierung wird angenommen, dass ein für das Sanierungsjahr typisches Bauteil verwendet wurde (vgl. hierzu Abschnitt 5.3.7).

Die zufallsziehungsbedingte Unsicherheit wird in Kapitel 7 durch eine *Monte-Carlo*-Simulation analysiert. Die Lebensdauern bzw. Sanierungszyklen werden in Szenarien variiert.

5.3.7 Oberer Gebäudeabschluss, Fenster, Außenwände und unterer Gebäudeabschluss

Die IWU-Gebäudetypologie weist für jeweils einen realen (weitgehend nicht energetisch modernisierten) Repräsentanten je Baualtersklassen-Gebäudetyp-Kombination den Ist-Zustand der Gebäudehülle mit Bauteilflächen und Wärmedurchgangskoeffizienten aus (IWU 2005). Um jedoch die sich aus der Sanierungstätigkeit bis zum Jahr 2006 ergebende Heterogenität des Gebäudebestands sowie ab dem Jahr 2006 die sich daraus ergebende Vielfalt an Sanierungsvarianten und zugehörigen Investitionen berücksichtigen zu können, war eine Erweiterung der IWU-Gebäudetypologie notwendig. Daher wurde sie von Stengel u. a. (2012) verfeinert, indem für jede Kombination aus Gebäudetyp und Baualtersklasse neben dem Urzustand auf Basis der gesetzlichen Anforderungen (Wärmeschutzverordnungen, Energieeinsparverordnungen etc.) unterschiedliche Sanierungsepochen mit entsprechenden typischen Wärmedurchgangskoeffizienten (U-Werten) dieser Zeit definiert wurden. Dies wurde nicht nur für den Bestand, sondern auch für die zukünftig möglichen Sanierungen durchgeführt. Die relevanten Daten zu diesen Sanierungsepochen sind in vereinfachter Form in Tabelle 24 dargestellt, wobei die ersten Sanierungsepochen bei jüngeren Baualtersklassen entsprechend wegfallen. Insbesondere bei Fachwerkbauten ergeben sich bspw. aufgrund von Innendämmungen leichte Abweichungen von den dargestellten Werten.

Tabelle 24: Vereinfachte Darstellung relevanter Kennzahlen der in *AWOHM* definierten Sanierungsepochen (in Anlehnung an: Stengel u. a. 2012)

Qualitätsstufe	Orientierung an	Sanierungs- epoche	U-Wert [W/(K*m ²)]				g-Wert [-] Fenster
			Fenster	Oberer Gebäude- abschluss	Außen- wände	Unterer Gebäude- abschluss	
1	-	Bis 1967	>2,57	>2,6	>1,9	>1,6	0,76
2	DIN 4108	1968-1977	2,57	1,2	1,2	0,91	0,76
3	WSchV 78	1978-1981	2,57	0,45	1,2	0,91	0,76
4	WSchV 82	1982-1994	1,8	0,3	1,2	0,55	0,76
5	WSchV 95	1995-2001	1,3	0,3	0,5	0,4	0,63
6	EnEV 02	2002-2003	1,3	0,3	0,5	0,4	0,63
7	EnEV 04	2004-2006	1,3	0,3	0,45	0,4	0,63
8	EnEV 07	2007-2008	1,3	0,3	0,45	0,4	0,63
9	EnEV 09	2007-2030a	1,3	0,24	0,24	0,3	0,63
10	EnEV 09-30%	2007-2030b	1	0,17	0,17	0,21	0,63
11	EnEV 09-50%	2007-2030c	0,7	0,12	0,12	0,15	0,63

Attribute, Kürzel und Wertebereiche je *oberem Gebäudeabschluss*, *Fenster*, *Außenwand* und *unterem Gebäudeabschluss* sind mit den zugehörigen Quellen in Tabelle 25 angegeben. In *AWOHM* sind 62 obere Gebäudeabschlüsse, 57 Fenster, 69 Außenwände und 57 untere Gebäudeabschlüsse hinterlegt. Neben Wärmedurchgangskoeffizienten (U-Werten) und g-Werten, die für die Energiebedarfsberechnung notwendig sind, wird über die boolesche Variable *Im Urzustand* angegeben, ob es sich um im Urzustand eines Gebäudetyps verbaute Bauteile bzw. Bauteilcharakteristika handelt und, falls ja, welches der entsprechende Fremdschlüssel zu den *energetischen Stammdaten* ist. Somit können zu einem Gebäudetyp die entsprechenden Bauteilcharakteristika im Urzustand identifiziert werden. Für die Simulation der Sanierung bzw. der Sanierungsentscheidung und ihrer Konsequenzen werden auch Investitionen⁸³ mit dem jeweiligen Preisstand, Sanierungsepochen, innerhalb derer die Bauteile verbaut (bzw. modernisiert) werden können bzw. konnten, sowie Informationen hinsichtlich der Anwendbarkeit bei bestimmten Gebäudetypen hinterlegt. Die Qualitätsstufen sind prinzipiell das ordinale Pendant zu den U-Werten bzw. den Sanierungsepochen und reichen von 0 (Gebäude im Urzustand) bis 11 (beste).

⁸³ Es handelt sich hierbei jeweils um die Mehrinvestitionen im Vergleich zur nicht-energetischen Sanierung der Gebäudehülle. Vgl. Abschnitte 5.4.2 und 5.4.3.2 (Ö2a) für eine detaillierte Erläuterung.

Tabelle 25: Attribute, Kürzel, Wertebereiche und Quellen je *oberem Gebäudeabschluss*, *Fenster*, *Außenwand* und *unterem Gebäudeabschluss* (Instanzen der Klasse *Außenwand* finden sich stellvertretend in Tabelle 133 in Anhang A.1)

Objekt	Attribut	Kürzel	Wertebereich	Quelle
Oberer Gebäudeabschluss <i>ho</i> , Fenster <i>hf</i> , Außenwand <i>hw</i> , Unterer Gebäudeabschluss <i>hu</i>	Im Urzustand	-	Ja, nein	IWU-Gebäudetypologie
	Fremdschlüssel energetische Stammdaten	-	Long	Zugehörige energetische Stammdaten <i>gs</i>
	Qualitätsstufe	$QS_{ho}, QS_{hf}, QS_{hw}, QS_{hu}$	0, 1, ..., 11 [-]	Beliebige aufsteigende Nummerierung
	Sanierungsjahr von	-	0, ..., 2007 [a]	DIN 4108, WSchV 78/82, WSchV
	Sanierungsjahr bis	-	1967, ..., 2050 [a]	95, EnEV 02/07/09, IWU-Gebäudetypologie
	Orientierung an	-	-, DIN 4108, WSchV 78/82, WSchV 95, EnEV 02/07/09/09-30%/09-50%	
	U-Wert	$U_{ho}, U_{hf}, U_{hw}, U_{hu}$	Double [W/(m ² K)]	
	Investition (brutto)	$\bar{I}_{ho}, \bar{I}_{hf}, \bar{I}_{hw}, \bar{I}_{hu}$	Double [€/m ²]	BKI (2010)
	Preisstand	-	2009 [a]	
	Beschreibung	-	String	Beliebige Anmerkung
Oberer Gebäudeabschluss <i>ho</i>	ID	<i>ho</i>	Long	Beliebig, wenn eindeutig
	Anwendbarkeit HH und HH_NBL	-	Ja, nein	Stengel u. a. (2012)
	Anwendbarkeit RH bis GMH	-	Ja, nein	
Fenster <i>hf</i>	ID	<i>hf</i>	Long	Beliebig, wenn eindeutig
	Gesamtenergiedurchlassgrad der Verglasung eines Fensters (g-Wert)	G_{hf}	Double [-]	IWU-Gebäudetypologie
Außenwände <i>hw</i>	ID	<i>hw</i>	Long	Beliebig, wenn eindeutig
	Anwendbarkeit Fachwerk	-	Ja, nein	Stengel u. a. (2012)
	Anwendbarkeit Massivbau	-	Ja, nein	
	Anwendbarkeit HH und HH_NBL	-	Ja, nein	
	Anwendbarkeit RH bis GMH	-	Ja, nein	
Unterer Gebäudeabschluss <i>hu</i>	ID	<i>hu</i>	Long	Beliebig, wenn eindeutig

5.3.8 Wärmeversorgungspaket

Analog zu den *Hüllenpaketen* existiert im Startjahr der Simulation zu jedem *Einzelgebäude* genau ein aktuelles *Wärmeversorgungspaket*, auf das dieses *Einzelgebäude* verweist. Eine detaillierte Charakterisierung der Wärmeversorgung wird benötigt, um vom Nutzenergiebedarf auf den Endenergiebedarf, Emissionen und Energiekosten schließen zu können. Attribute, Kürzel und Wertebereiche je *Wärmeversorgungspaket* sind mit den zugehörigen Quellen in Tabelle 26 angegeben. Da zu jedem *Einzelgebäude* für den Startbestand genau ein *Wärmeversorgungspaket* erzeugt wird, kann der Fremdschlüssel des

Einzelgebäudes auf das *Wärmeversorgungspaket* gesetzt werden. Im Startjahr 2006 der Simulation ist der Fremdschlüssel des *Wärmeversorgungspakets* zum vorherigen *Wärmeversorgungspaket* „null“. Wird während der Simulation der Bestandsveränderung eine Änderung am *Wärmeversorgungspaket* durchgeführt, so wird ein neues *Wärmeversorgungspaket* erzeugt, das auf das alte *Wärmeversorgungspaket* per Fremdschlüssel verweist. Der Fremdschlüssel des zugehörigen *Einzelgebäudes* wird hinsichtlich des neuen *Wärmeversorgungspakets* aktualisiert. Da Analoges für das *Hüllenpaket* gilt, ist die Entwicklung jedes *Einzelgebäudes* in Bezug auf dessen *Wärmeversorgungspaket* und *Hüllenpaket* vollständig nachvollziehbar.

Tabelle 26: Attribute, Kürzel, Wertebereiche und Quellen je *Wärmeversorgungspaket v*

Attribut	Kürzel	Wertebereich	Quelle
ID	<i>v</i>	Long	Beliebig, wenn eindeutig
Fremdschlüssel Wärmeversorgungspaket vorherig	-	Long	Zugehöriges vorheriges Wärmeversorgungspaket <i>v</i>
Beschreibung	-	String	Beliebige Anmerkung

Jedes *Wärmeversorgungspaket* wird auf Basis des SUF des Mikrozensus 2006 erzeugt. Auf Basis ausgewählter Merkmale des Mikrozensus wird durch Ziehung aus einer Wahrscheinlichkeitsverteilung für jedes *Einzelgebäude* bestimmt, welche *Wärmeerzeuger*, welche *Verrohrung und Speicher* sowie welche *Energieträgerverfügbarkeit* das *Wärmeversorgungspaket* beinhaltet. Die herangezogenen Merkmale des Mikrozensus umfassen die überwiegend für die Beheizung der Wohnungen verwendete Energieart (EF497), die überwiegend für die Warmwasserversorgung der Wohnungen verwendete Energieart (EF497), die Beheizungsstruktur bzw. Zentralität der Beheizung (EF496) sowie die abgeleiteten Größen Baujahr des Gebäudes (vgl. Abschnitt 5.3.4) und Gebäudetyp (vgl. Abschnitt 5.3.5). Die in *AWOHHM* berücksichtigten *Wärmeerzeuger*, *Verrohrungen und Speicher* sowie die *Energieträgerverfügbarkeit* werden in den Abschnitten 5.3.9 bis 5.3.11 zusammen mit der jeweiligen Zuordnungsprozedur, die auf den erwähnten Mikrozensusmerkmalen basiert, erläutert. Die durch diesen Ansatz eingebrachte Unsicherheit wird in Kapitel 7 durch eine *Monte-Carlo*-Simulation analysiert.

5.3.9 Stammdaten Wärmeerzeuger, Wärmeerzeuger und Energieträger

Die Instanzen der Klassen *Wärmeerzeuger* und *Stammdaten Wärmeerzeuger* werden benötigt, um (bei gebäudeintegrierter Wärmeerzeugung) vom Wärmeoutput des Wärmeerzeugers, der basierend auf dem Nutzenergiebedarf zuzüglich Speicher- und Leitungsverlusten (vgl. Abschnitt 5.3.11) bestimmt wird, auf den Endenergiebedarf, d. h. den Wärmeerzeugerinput, Luftschadstoff- und Treibhausgasemissionen sowie Energiekosten zu schließen. Auch Investitionen in eine energetische Modernisierung werden durch die *Wärmeerzeuger* beeinflusst. *Wärmeerzeuger* werden auf Mikroebene modelliert. *Stammdaten Wärmeerzeuger* entsprechen dagegen Wärmeerzeugertypen. Attribute, Kürzel, Wertebereiche und Quellen zu den *Stammdaten Wärmeerzeuger* sind in Tabelle 27 angegeben. Die Qualitätsstufe reicht von 0 (schlechteste – nicht mehr verbaubar) bis 3 (beste) und dient der Einschränkung zulässiger technischer Alternativen durch den Gesetzgeber. Beispiele bei gasbefeuerten Kesseln sind Brennwertkessel (Stufe 3) und Niedertemperaturkessel (Stufe 2). Die Qualitätsstufen orientieren sich an Jahresnutzungsgraden und Emissionsfaktoren für CO₂, NO_x, SO₂, VOC, CH₄, NMVOC und PM, die jeweils für die Bestimmung von Endenergiebedarf und Emissionen benötigt werden. Die auf den gesamten deutschen Anlagenbestand in Wohngebäuden bezogenen Attribute geräte- und brennstoffbezogener Endenergieverbrauch, jährliche Vollbenutzungsstunden, Anlagenbestand in den Altersklassen (bez. des Einbaujahrs) bis 1989, 1990-2004 und ab 2005 sowie mittlere Leistung können zur Plausibilisierung der Modellergebnisse auf Deutschlandebene herangezogen werden. Die Eignung eines Wärmeerzeugertyps für einen Gebäudetyp wird durch die Leistungsklasse, die durch eine Untergrenze und eine Obergrenze definiert wird, festgelegt bzw. eingeschränkt. Zu einer Referenzleistung wird die Investition für den Wärmeerzeuger mit Preisstand, enthaltenen Elementen und Modernisierungsanteil vorgehalten. Somit können bei Erreichen der Lebensdauer eines alten Wärmeerzeugers die Investition in potenzielle neue Wärmeerzeuger sowie der

Modernisierungsanteil bestimmt werden. Als Vorbereitung für die Zuordnung der *Einzelgebäude* zu den *Stammdaten Wärmeerzeuger* wurden für Letztere Annahmen getroffen, ob diese für eine dezentrale Raumheizung, Etagenraumheizung, zentrale Raumheizung, dezentrale WW⁸⁴-Bereitung, Etagen-WW-Bereitung, zentrale WW-Bereitung, dezentrale Raumwärme- und WW-Bereitung, Etagen-Raumwärme- und -WW-Bereitung sowie zentrale Raumwärme- und Warmwasserbereitung eingesetzt werden können. Des Weiteren wurde spezifiziert, ob diese als Haupt- oder Nebenversorger einsetzbar sind. In Bezug auf die Simulation der Bestandsentwicklung wird auch vorgegeben, welche Wärmeerzeuger ab 2006 noch verbaubar sind. Die Stammdaten der Wärmeerzeuger basieren überwiegend auf der Arbeit von Struschka u. a. (2008). Da sich deren Arbeit auf Feuerungsanlagen beschränkt, wurden diese Wärmeerzeuger um elektrische (dezentrale WW-Bereitung, dezentrale Raumwärmebereitstellung, zentrale Anlagen) und solarthermische (Flach- und Röhrenkollektoren) Wärmeerzeuger sowie Fernwärmeübergabestationen ergänzt, womit sich insgesamt 83 Wärmeerzeugertypen (vgl. Anhang A.1) ergeben.

Die modellierten Wärmeerzeugertypen entsprechen (insbesondere bei Festbrennstoffen) Wärmeerzeuger-Energieträger-Kombinationen und umfassen als Energieträger Gas, Öl, Holz/Holzpellets, Elektrizität, Heizöl, Briketts/Braunkohle, Steinkohle/-koks/-briketts, Böhmische/Lausitzer Braunkohlebriketts, Solarenergie und Fernwärme. Die Merkmale EF497 und EF498 des Mikrozensus sind mit den Ausprägungen Fernwärme, Gas, Elektrizität, Briketts oder Braunkohle, Koks oder Steinkohle sowie Holz oder sonstige erneuerbare Energieträger (Sonnen-, Windenergie, Wärmepumpe u. Ä.) aggregierter. Diese werden ergänzt um Solarenergie auch in *AWOHH* verwendet bzw. wird auf diese per Fremdschlüssel verwiesen.

⁸⁴ WW steht für Warmwasser.

Tabelle 27: Attribute, Kürzel, Wertebereiche und Quellen der Stammdaten *Wärmeerzeuger vws* (Instanzen der Klasse finden sich in Tabelle 131 in Anhang A.1)

Attribut	Kürzel	Wertebereich	Quelle
ID	vws	Long	Beliebig, wenn eindeutig
Beschreibung	-	String	Beliebige Anmerkung
Qualitätsstufe	-	0, 1(*), 2(**), 3(***)	Annahmen des Autors
Jahresnutzungsgrad	η_{vws}	Double [-]	Annahmen des Autors basierend auf Pistohl (2000)
CO ₂ -Emissionsfaktor (exkl. Biomasse)	$EF_{vws,CO_2,exkl. Biomasse}$	Double [kg/kWh]	Struschka u. a. (2008)
CO ₂ -Emissionsfaktor	$EF_{vws,m} mit$	Double [kg/kWh]	
NO _x -Emissionsfaktor	$m \in M =$	Double [kg/kWh]	
SO ₂ -Emissionsfaktor	$\{CO_2, NO_x, SO_2, VOC,$	Double [kg/kWh]	
VOC-Emissionsfaktor	$CH_4, NMVOC, PM\}$	Double [kg/kWh]	
CH ₄ -Emissionsfaktor		Double [kg/kWh]	
NMVOEmissionsfaktor		Double [kg/kWh]	
PM-Emissionsfaktor		Double [kg/kWh]	
Gerätbezogener Endenergieverbrauch 2005	-	Double [TJ/a]	
Brennstoffbezogener Endenergieverbrauch 2005	-	Double [TJ/a]	
Jährliche Vollbenutzungsstunden	-	Double [h/a]	
Bestand in 2005 mit Baujahr bis 1989	-	Integer [Wärmeerzeuger]	
Bestand in 2005 mit Baujahr 1990-2004	-	Integer [Wärmeerzeuger]	
Bestand in 2005 mit Baujahr ab 2005	-	Integer [Wärmeerzeuger]	
Mittlere Leistung	-	Double [kW]	
Leistungsklasse	-	1, 2, 3	
Untergrenze der Leistungsklasse	-	Double [kW]	
Obergrenze der Leistungsklasse	-	Double [kW]	
Referenzleistung	-	Double [kW]	
Ist Pelletkessel	PK_{vws}	ja, nein	
Fremdschlüssel Energieträger (bzw. Anteil eines Energieträgers am Endenergiebedarf)	$DA_{et,vws}$	Long bzw. double (vgl. Tabelle 29)	
Investition (brutto)	I_{vws}	Double [€]	Staatliche Vermögens- und Hochbauverwaltung Baden-Württemberg (2006)
Preisstand	-	Integer [a]	
In Investition enthalten	-	String	
Modernisierungsanteil	MA_{vws}	Double [€/€]	Annahmen des Autors basierend auf Verhoog (2012)
Lebensdauer	-	Double [a]	Annahmen des Autors basierend auf VDI 2067 (2000)
Verbaubar	-	ja, nein	Annahmen des Autors
Kompatibel mit Raumheizung dezentral	-	ja, nein	
Kompatibel mit Raumheizung Etage	-	ja, nein	
Kompatibel mit Raumheizung zentral	-	ja, nein	
Kompatibel mit Raumwärme- und WW-Bereitung dezentral	-	ja, nein	
Kompatibel mit Raumwärme- und WW-Bereitung Etage	-	ja, nein	
Kompatibel mit Raumwärme- und WW-Bereitung zentral	-	ja, nein	
Kompatibel mit WW-Bereitung dezentral	-	ja, nein	
Kompatibel mit WW-Bereitung Etage	-	ja, nein	
Kompatibel mit WW-Bereitung zentral	-	ja, nein	
Möglicher Hauptversorger	-	ja, nein	
Möglicher Nebenversorger	-	ja, nein	

Attribute, Kürzel, Wertebereiche und Quellen zu *Energieträgern* sind in Tabelle 28 angegeben. Über die Attribute können auf Basis des Endenergiebedarfs auch die Energiekosten sowie der gesamte und der nicht erneuerbare Primärenergiebedarf⁸⁵ bestimmt werden. Auch qualitative Rückschlüsse hinsichtlich Unabhängigkeit bei der Energieversorgung⁸⁶, Prestige⁸⁷ und der Nutzung erneuerbarer Energien können basierend auf den Energieträgern gezogen werden.

Tabelle 28: Attribute, Kürzel, Wertebereiche und Quellen der *Energieträger et*

Attribut	Kürzel	Wertebereich	Quelle
ID	<i>et</i>	Long	Beliebig, wenn eindeutig
Energieträgername	-	String	SUF 2006 – EF497 und EF498
Endenergiebezogener Preis eines Energieträgers (inkl. Abgaben und Steuern, 2006)	P_{et}	Double [€/kWh]	AGFW (2010); Frontier Economics Ltd. (2010); Deutscher Energieholz- und Pellet-Verband e.V. (2013)
Primärenergiefaktor (einschließlich erneuerbarem Anteil) eines Energieträgers [kWh/kWh]	PEF_{et}	Double [kWh/kWh]	DIN EN 15603 (2008)
Primärenergiefaktor (nicht erneuerbarer Anteil) eines Energieträgers [kWh/kWh]	$PEF_{NE,et}$	Double [kWh/kWh]	
Unabhängigkeit eines Energieträgers [-]	UN_{et}	0 (niedrig), 1, 2,	Annahmen des Autors
Prestige eines Energieträgers [-]	PR_{et}	3 (hoch)	
Ist erneuerbar	-	Ja, nein	

Tabelle 29 zeigt die in *AWOHM* verwendeten Instanzen der Klasse *Energieträger* mit den zugehörigen Attributen. Die insbesondere bei Festbrennstoffen feinere Energieträgerdifferenzierung nach Struschka u. a. (2008) wird implizit über die wärmeerzeugerspezifischen Emissionsfaktoren berücksichtigt.

Zur Berücksichtigung der Leistung der Anlagentechnik wurden drei Leistungsklassen (1: <25 kW; 2: 25-50 kW; 3: 50-1000 kW) unterschieden und den aus den Mikrozensusmerkmalen abgeleiteten Gebäudetypen RH/EFH (<25 kW), MFH/MFH_NBL (25-50 kW) und GMH/GMH_NBL/HH/HH_NBL (50-1.000 kW)

⁸⁵ Vgl. Fußnote 187 und Abschnitt 8.2 bez. indirekter Emissionen. Diese werden in *AWOHM* nicht berücksichtigt.

⁸⁶ Als Beurteilungskriterien werden dabei die generelle Abhängigkeit von einem Energielieferanten, die Speicherfähigkeit von Energieträgern in der Immobilie (Entkopplung von Bereitstellung und Bedarf) und die Importabhängigkeit von Energieträgern herangezogen.

⁸⁷ Als Beurteilungskriterien werden dabei Treibhausgas- und Luftschadstoffemissionen sowie der Innovationsgrad von Technologien herangezogen.

zugeordnet. Hintergrund der unterschiedenen Leistungsklassen sind überschlägig angenommene Heizlasten der unterschiedlichen Gebäudegrößen in der Gebäudetypologie. Die angenommene Kesselauslegung orientiert sich damit nicht an der exakten Heizlast, die sich je nach Sanierungszustand der Gebäudehülle und Nutzerverhalten unterscheidet, sondern stellt eine Abschätzung der möglichen Bandbreite dar. Die gewählten Leistungsintervalle sind insbesondere an der Möglichkeit der Zuordnung von Emissionsfaktoren auf Basis von Struschka u. a. (2008) ausgerichtet. Bei der Beheizungsstruktur (EF496) werden im Mikrozensus Fernheizung, Block- oder Zentralheizung, Etagenheizung sowie Einzel- oder Mehrraumöfen (auch Elektrospeicher) differenziert.

Tabelle 29: In *AWOHH* verwendete Instanzen der Klasse *Energieträger* (Datengrundlage: vgl. Tabelle 28)

ID	Energieträgername	Preise 2006, brutto [€/kWh]	Primärenergiefaktoren [kWh/kWh]		Unabhängigkeit	Prestitige	Ist erneuerbar
			Nicht erneuerbar	Erneuerbar			
1	Fernwärme	0,07	0,6	0,6	0	2	Nein
2	Gas	0,06	1,36	1,36	0	1	Nein
3	Elektrizität	0,19	3,14	3,31	0	0	Nein
4	Heizöl	0,06	1,35	1,35	1	1	Nein
5	Briketts, Braunkohle	0,05	1,4	1,4	2	0	Nein
6	Koks, Steinkohle	0,05	1,53	1,53	2	0	Nein
7	Holz oder sonstige erneuerbare Energieträger (ohne Solarenergie)	0,05	0,06	1,06	2	2	Ja
8	Solarenergie	0	0	1	3	3	Ja

Attribute, Kürzel, Wertebereiche und Quellen je *Wärmeerzeuger* sind in Tabelle 30 angegeben. Eine Instanz der Klasse *Wärmeerzeuger* wird für jedes *Wärmeversorgungspaket* und damit für jedes *Einzelgebäude* mindestens einmal erzeugt und spezifiziert die Anzahl an Anlagen eines Wärmeerzeugertyps, d. h. einer Instanz der Klasse *Stammdaten Wärmeerzeuger*, die ein *Wärmeversorgungspaket* umfasst. Ein *Wärmeversorgungspaket* kann also mehrere *Wärmeerzeuger* umfassen.

Bei der Zuordnung von *Wärmeerzeugern* zu einem *Wärmeversorgungspaket* und damit *Einzelgebäude* wird **im ersten Schritt** überprüft, ob zwischen dem Gebäudebaujahr und dem Startjahr der Simulation (2006) die basierend auf VDI 2067 (2000) mit 20 Jahren angesetzte Lebensdauer von Wärmeerzeugern

(*sonstige Parameter*) überschritten wurde und, falls ja, in welchem Jahr – dem Baujahr des „neuen“ *Wärmeerzeugers*. Falls sie mehrfach überschritten wurde, so wird der spätere Zeitpunkt gewählt. Zudem wird die Leistungsklasse des *Einzelgebäudes* auf Basis der Gebäudetypen bestimmt bzw. abgeschätzt.

Tabelle 30: Attribute, Kürzel, Wertebereiche und Quellen je *Wärmeerzeuger vw*

Attribut	Kürzel	Wertebereich	Quelle
ID	<i>vw</i>	Long	Beliebig, wenn eindeutig
Fremdschlüssel Wärmeversorgungs paket	-	Long	Zugehöriges Wärmeversorgungs paket <i>v</i>
Fremdschlüssel Stammdaten Wärmeerzeuger	<i>vwS_vw</i>	Long	Zugehörige Stammdaten Wärmeerzeuger <i>vwS</i>
Anzahl	-	Integer [Wärmeerzeuger]	Vgl. Tabelle 32
Deckungsanteil WW	<i>DA_WASSER_vw</i>	Double [-]	Annahmen des Autors
Deckungsanteil Raumwärme	<i>DA_RAUM_vw</i>	Double [-]	
Baujahr	-	Integer [a]	Abgeleitet auf Basis des Baujahrs des Gebäudes (<i>Einzelgebäude</i>) und der Lebensdauer von Wärmeerzeugern (<i>sonstige Parameter</i>)
Leistung	-	Double [kW]	Mittlere Leistung aus zugehörigen Stammdaten Wärmeerzeuger

Im zweiten Schritt werden für jedes *Wärmeversorgungs paket* die potenziellen *Wärmeerzeuger* identifiziert. Basis für diese Zuordnung ist eine Klasse mit den in Tabelle 31 dargestellten Attributen. Für jede in den Datensätzen des SUF des Mikrozensus 2006 vorkommende Kombination aus dem überwiegend für die Raumwärme und die Warmwasserbereitung verwendeten Energieträger, der Beheizungsstruktur bzw. Zentralität sowie der vom Gebäudetyp abgeleiteten Leistungsstufe der Raumheizung wird angegeben, welche *Stammdaten Wärmeerzeuger* in Frage kommen und wofür diese eingesetzt werden können (reine Raumheizung/kombinierte Raumheizung und Warmwasserbereitung/reine Warmwasserbereitung). Somit kann für jedes *Wärmeversorgungs paket* eine Liste potenzieller *Stammdaten Wärmeerzeuger* identifiziert werden.

Da zu der über Tabelle 31 spezifizierten Klasse 2.251 Instanzen existieren, wird auf eine vollständige Darstellung verzichtet und im Folgenden nur auf die wichtigsten der Zuordnung zugrundeliegenden Prinzipien eingegangen.

Liegt eine Fernwärme-, Block- oder Zentralheizung vor, so entspricht die Leistungsklasse des *Wärmeerzeugers* für die Raumwärmebereitstellung derjenigen des Gebäudetyps. Liegt eine Etagenheizung bzw. Einzel- oder Mehrraum-

öfen vor, so entspricht die Leistungsklasse des Wärmeerzeugers für die Raumwärmebereitstellung der niedrigsten Leistungsklasse (<25 kW). Dies gilt auch im Falle einer kombinierten Raumwärme- und Warmwasserbereitung. Bei separater Warmwasserbereitung wird grundsätzlich die niedrigste Leistungsklasse (<25 kW) für die Warmwasserbereitung unterstellt.

Tabelle 31: Attribute, Wertebereiche und Quellen der Klasse zur Zuordnung potenzieller Wärmeerzeuger und Einsatzbereiche zu den Anlagentechnikmerkmalen des SUF des Mikrozensus 2006

Attribut	Wertebereich	Quelle
ID	Long	Beliebig, wenn eindeutig
Fremdschlüssel Energieträger Raumheizung	Long (vgl. Tabelle 28 und Tabelle 29)	SUF 2006 – EF 497
Fremdschlüssel Energieträger WW	Long (vgl. Tabelle 28 und Tabelle 29)	SUF 2006 – EF 498
Zentralität Mikrozensus	1 (Fernheizung), 2 (Blockheizung, Zentralheizung), 3 (Etagenheizung), 4 (Einzel- oder Mehrraumöfen, auch Elektro-speicher)	SUF 2006 – EF 496
Leistungsklasse Raumheizung	1 (<25 kW), 2 (25-50 kW), 3 (50-1000 kW)	Abgeleitet vom Gebäudetyp
Fremdschlüssel Stammdaten Wärmeerzeuger	Long	Zugehörige Stammdaten Wärmeerzeuger <i>wws</i>
Ist raumheizungskompatibel	ja, nein	Annahmen des Autors
Ist raumheizungs-WW-kompatibel	ja, nein	
Ist WW-kompatibel	ja, nein	

Die Einsatzbereiche eines Wärmeerzeugers können, müssen aber nicht eindeutig sein. Bspw. werden Durchlaufwasserheizer und Vorratswasserheizer eindeutig für die Warmwasserbereitstellung, Kombiwasserheizer eindeutig für die kombinierte Raumwärme- und Warmwasserbereitstellung und Kamine eindeutig für die reine Raumwärmebereitstellung eingesetzt. Auf der anderen Seite kann jegliche Art von Zentralheizung sowohl für die reine Raumwärmebereitstellung als auch für die kombinierte Raumwärme- und Warmwasserbereitstellung eingesetzt werden. Nebenwärmeerzeuger werden nur im Falle der Warmwasserbereitung berücksichtigt, nämlich falls die Raumwärmebereitstellung zentral, aber nicht überwiegend mittels erneuerbarer Energieträger erfolgt und die Warmwasserbereitung überwiegend mittels erneuerbarer Energieträger. In diesem Falle wird angenommen, dass die Warmwasserbereitung auf Solarenergie und Zentralheizung basiert.

Im dritten Schritt werden die potenziellen *Wärmeversorgungspakete* identifiziert. Hierbei ist die Grundvoraussetzung, dass sowohl Raumwärme als auch Warmwasser erzeugt werden kann. Dies bedeutet, dass nur Kombinationen von Wärmeerzeugern möglich sind, die hinsichtlich ihrer Einsatzbereiche beides abdecken können. Tabelle 32 gibt eine Übersicht über Art und Anzahl von *Wärmeerzeugern* und *Verrohrungen* in Abhängigkeit von den potenziellen Wärmeerzeugern, der Zentralität und dem Energieträger für die Warmwasserbereitung. Es wird angenommen, dass jeder potenzielle Wärmeerzeuger, der nur Raumwärme bereitstellen kann, mit jedem Wärmeerzeuger, der nur Warmwasser bereitstellen kann, kombiniert werden kann. Zudem können Wärmeerzeuger, die kombiniert Raumwärme und Warmwasser bereitstellen können, entweder alleine oder in Kombination mit solarthermischer Unterstützung eingesetzt werden. Neben der Anzahl der benötigten Wärmeerzeuger werden auch Anzahl und Art der benötigten Verrohrungen abgeschätzt. Am Rande werden auch Speicher, Heizkörper, Schaltungen und Pumpen berücksichtigt (vgl. Abschnitt 5.3.11).

Bei Fern-, Block- oder Zentralheizung werden für die Raumwärmebereitstellung ein Wärmeerzeuger, eine zentrale Verrohrung sowie die zugehörigen Heizkörper, Schaltungen und Pumpen benötigt. Erfolgen die Raumwärmebereitstellung und die Warmwasserbereitung getrennt, so werden im Falle elektrischer Warmwasserbereitung pro Wohnung zwei Warmwassererzeuger und dezentrale Verrohrungen, Schaltungen und Pumpen angesetzt. Im Falle nicht-elektrischer Warmwasserbereitung wird von einem Wärmeerzeuger sowie einer zentralen Warmwasserverrohrung samt Schaltungen und Pumpen ausgegangen. Bei kombinierter Raumwärme- und Warmwassererzeugung wird eine zentrale Warmwasserverrohrung samt Schaltungen und Pumpen unterstellt, wobei im Falle solarthermischer Unterstützung ein zweiter Wärmeerzeuger hinzukommt.

Tabelle 32: Übersicht über Art und Anzahl von *Verrohrung* und *Wärmeerzeugern* in Abhängigkeit von den potenziellen Wärmeerzeugern, der Zentralität und dem Energieträger für die Warmwasserbereitung (Datengrundlage: Annahmen); WE: Anzahl Wohneinheiten; WW: Warmwasser, RW: Raumwärme⁸⁸

Wärmeerzeuger 1	Wärmeerzeuger 2	Zentralität	Energieträger WW	Anzahl Wärmeerzeuger			Verrohungsart		Verrohrungsanzahl		
				RW	WW	Kombi	RW	WW	RW	WW	
Keine Raumheizungskompatibilität	Keine WW-Kompatibilität	Fern-, Block- oder Zentralheizung	Elektrizität	1	2* WE	-	Zentral	Dezentral	1	2* WE	
			Sonstige	1	1	-	Zentral	Zentral	1	1	
		Etagenheizung	Elektrizität	WE	2* WE	-	Etage	Etage	WE	2* WE	
			Fernwärme	WE	1	-	Etage	Zentral	WE	1	
		Einzel- oder Mehrraumöfen	Sonstige	WE	WE	-	Etage	Etage	WE	WE	
			Elektrizität	3*WE	WE	-	Dezentral (fiktiv)	Dezentral	3*WE	WE	
		Fernwärme	3*WE	1	-	Dezentral (fiktiv)	Zentral	3*WE	1		
		Sonstige	3*WE	WE	-	Dezentral (fiktiv)	Dezentral	3*WE	WE		
Raumheizungs-WW-Kompatibilität	Solarthermie	Fern-, Block- oder Zentralheizung	Erneuerbare Energien	-	1	1	Zentral	Zentral	1	1	
		Etagenheizung		-	1	WE	Etage	Etage	WE	WE	
		Fern-, Block- oder Zentralheizung	Beliebig		-	-	1	Zentral	Zentral	1	1
					-	-	WE	Etage	Etage	WE	WE
		Einzel- oder Mehrraumöfen		-	-	WE	Dezentral (fiktiv)	Dezentral	WE	WE	

Bei Etagenheizungen werden für die Raumwärmebereitstellung pro Wohnung ein Wärmeerzeuger sowie eine Verrohrung samt Heizkörpern, Schaltungen und Pumpen angesetzt. Bei Einzel- oder Mehrraumöfen wird für die Raumwärmebereitstellung bei getrennter Raumwärme- und Warmwasserbereitung pro Wohnung von drei Wärmeerzeugern ausgegangen. Verrohrung, Heizkörper, Schaltungen und Pumpen sind in diesem Falle nur fiktiv. Bei kombinierter Erzeugung wird ein kombinierter Raumwärme-Warmwassererzeuger pro Wohnung unterstellt. Die jeweilige Warmwasserversorgung ist Tabelle 32 zu entnehmen.

⁸⁸ Der Fall der Etagenheizung mit solarthermischer Unterstützung bezieht sich überwiegend auf (wenige) Mikrozensusdatensätze, bei denen bei Ein- und Zweifamilienhäusern Etagenheizungen angegeben wurden.

Im vierten Schritt wird jedem potenziellen *Wärmeversorgungspaket*, da meist mehrere existieren, eine Wahrscheinlichkeit zugeordnet und anschließend aus der dadurch definierten Wahrscheinlichkeitsverteilung ein *Wärmeversorgungspaket* gezogen. Die dadurch eingebrachte Unsicherheit wird wiederum mittels *Monte-Carlo*-Simulation in Kapitel 7 analysiert. Für die Bestimmung der Wahrscheinlichkeit eines *Wärmeversorgungspakets* wird zunächst für alle zugehörigen Wärmeerzeuger der Gesamtbestand in privaten Haushalten in Deutschland in den jeweiligen Wärmeerzeugeraltersklassen bestimmt (vgl. Tabelle 30 für das Baujahr und Tabelle 27 für den Wärmeerzeugerbestand der jeweiligen Altersklasse – Merkmale: Bestand in 2005 mit Baujahr bis 1989, 1990-2004 und ab 2005). Der Gesamtbestand wird anschließend durch die Anzahl der in diesem Gebäude benötigten Wärmeerzeuger dieses Typs geteilt. Enthält das *Wärmeversorgungspaket* *Wärmeerzeuger* unterschiedlichen Typs, so wird das Minimum der sich ergebenden korrigierten Gesamtbestände gewählt.⁸⁹ Aus den resultierenden korrigierten Gesamtbeständen je *Wärmeversorgungspaket* werden Wahrscheinlichkeiten abgeleitet, indem Erstere durch die Summe der korrigierten Gesamtbestände aller potenziellen *Wärmeversorgungspakete* geteilt werden. Für den unbekanntem Anlagenbestand von elektrischen und fernwärmebasierten Wärmeerzeugern wird eine hinreichend große Zahl angesetzt, sodass die Ziehung durch diesen nicht beeinflusst wird. Da die verwendete Differenzierung bei diesen (elektrischen und fernwärmebasierten) *Wärmeerzeugern* kaum Alternativen vorsieht, führt dieses Vorgehen zu vernachlässigbaren Unsicherheiten. Der bisher niedrige Anteil von Wärmepumpen (vgl. Diefenbach u. a. 2010) und Mikro-Kraft-Wärme-Kopplungs-Anlagen wird bei dem beschriebenen Ansatz für den Startbestand vernachlässigt.

⁸⁹ Dabei wird implizit angenommen, dass die Wahrscheinlichkeit eines *Wärmeversorgungspakets* durch den Gesamtbestand des seltensten *Wärmeerzeugers* determiniert wird (bspw. der Gas-Brennwertkessel bei Kombinationen von Gas-Brennwertkesseln mit elektrischen Durchlauferhitzern) und unabhängig von dem Gesamtbestand der häufiger vorkommenden *Wärmeerzeuger* ist (bspw. der elektrischen Durchlauferhitzer bei Kombinationen von Gas-Brennwertkesseln mit elektrischen Durchlauferhitzern).

sigt und anderen Wärmeerzeugern zugerechnet. Eine weitere Einschränkung des Ansatzes ist, dass die Hochrechnungsfaktoren des Mikrozensus, die zu einer Modifikation der Wahrscheinlichkeitsverteilung führen können, unberücksichtigt bleiben. Insgesamt ermöglicht das Vorgehen jedoch die Ermittlung von Startbeständen auf Mikroebene, die mit dem Mikrozensus vollständig konsistent sind. Inwieweit mittels der getroffenen Annahmen eine Konsistenz der Startbestände mit Statistiken zum Wärmeerzeugerbestand (Merkmale zum Wärmeerzeugerbestand der jeweiligen Altersklasse) erreicht werden kann, wird bei der Plausibilisierung der Startbestandserstellung in Abschnitt 7.1 betrachtet.

5.3.10 Stammdaten Energieträgerverfügbarkeit und Energieträgerverfügbarkeit

Attribute, Kürzel, Wertebereiche und Quellen der *Stammdaten Energieträgerverfügbarkeit* sind in Tabelle 33 angegeben. Den Leistungsklassen der Gebäude entsprechend wird die Energieträgerverfügbarkeit für RH/EFH, MFH und GMH/HH (inkl. der Sonderbauten in den neuen Bundesländern) unterschieden. Die jeweilige Zugehörigkeit wird durch die booleschen Anwendbarkeitsattribute kenntlich gemacht. Es werden *Heizöltank und Kelleraufstellung, Erdgasanschluss, Flüssiggastank, Sacksilo und Fördereinrichtung, Schornstein bzw. Fernwärmeanschluss, Festbrennstofflager (ausschließlich Pellets) und Elektrizitätsanschluss* unterschieden. Die Energieträgerverfügbarkeit zu Beginn der Simulation im Jahr 2006 wird auf Basis der verwendeten Energieträger bestimmt. Zusätzlich wird angenommen, dass jedes Gebäude über einen Elektrizitätsanschluss verfügt. Die Energieträgerverfügbarkeit ist insbesondere von Bedeutung bei der Modellierung von Energieträgerwechseln, da dabei Investitionen (bspw. für einen Erdgasanschluss), umlagefähige Modernisierungsanteile und teilweise als Investitionen interpretierbare Ausgaben für die Demontage und Entsorgung eines alten Öltanks notwendig sind, die mit einer Beschreibung der enthaltenen Positionen im Modell vorgehalten werden. Die Investitionen beziehen sich auf eine Referenzfläche.

Tabelle 33: Attribute, Kürzel, Wertebereiche und Quellen der *Stammdaten Energieträgerverfügbarkeit ves* (Instanzen der Klasse finden sich in Tabelle 134 in Anhang A.1)

Attribut	Kürzel	Wertebereich	Quelle
ID	<i>ves</i>	Long	Beliebig, wenn eindeutig
Beschreibung	-	String	Beliebige Anmerkung
Anwendbarkeit in RH und EFH	-	ja, nein	Annahmen des Autors
Anwendbarkeit in MFH (bzw. MFH_NBL)	-	ja, nein	
Anwendbarkeit in GMH und HH (bzw. GMH_NBL und HH_NBL)	-	ja, nein	
Fremdschlüssel Energieträger	-	Long (vgl. Tabelle 29)	
Investition (brutto)	<i>I_{ves}</i>	Double [€]	Staatliche Vermögens- und Hochbauverwaltung Baden-Württemberg (2006)
Preisstand	-	Integer [a]	
In Investition enthalten	-	String	
Demontage- und Entsorgungsausgaben	<i>DI_{ves}</i>	Double [€]	
In Demontage- und Entsorgungsausgaben enthalten	-	String	
Referenzfläche	-	Double [m ²]	Annahmen des Autors basierend auf Verhoog (2012)
Modernisierungsanteil	<i>MA_{ves}</i>	Double [€/€]	

Die Instanzen der Klasse *Energieträgerverfügbarkeit*, deren Attribute, Kürzel, Wertebereiche und Quellen in Tabelle 34 angegeben sind, weisen auf Mikroebene einem *Wärmeversorgungspaket* eine oder (über mehrere Instanzen) mehrere *Stammdaten Energieträgerverfügbarkeit*, d. h. Energieträgerverfügbarkeitstypen, zu. Das Baujahr der entsprechenden Komponenten wird dabei ebenfalls vorgehalten. Das Vorgehen zur Ermittlung der Instanzen wurde in Abschnitt 5.3.9 beschrieben.

Tabelle 34: Attribute, Kürzel, Wertebereiche und Quellen je *Energieträgerverfügbarkeit ve*

Attribut	Kürzel	Wertebereich	Quelle
ID	<i>ve</i>	Long	Beliebig, wenn eindeutig
Fremdschlüssel Wärmeversorgungspaket	-	Long	Zugehöriges Wärmeversorgungspaket <i>v</i>
Fremdschlüssel Stammdaten Energieträgerverfügbarkeit	<i>ves_{ve}</i>	Long	Zugehörige Stammdaten Energieträgerverfügbarkeit <i>ves</i>
Baujahr	-	Integer [a]	Abgeleitet auf Basis des Baujahrs des Gebäudes (<i>Einzelgebäude</i>) und der Lebensdauer von Wärmeerzeugern (<i>sonstige Parameter</i>)

5.3.11 Stammdaten Verrohrung und Speicher sowie Verrohrung und Speicher

Attribute, Kürzel und Wertebereiche je *Stammdaten Verrohrung und Speicher* sind mit den zugehörigen Quellen in Tabelle 35 angegeben. Entsprechend den Leistungsklassen der Gebäude werden *Verrohrungen und Speicher* für RH/EFH, MFH und GMH/HH (inkl. der Sonderbauten in den neuen Bundeslän-

dern) unterschieden. Die jeweilige Zugehörigkeit wird durch die booleschen Anwendbarkeitsattribute kenntlich gemacht. *Verrohrung* und *Speicher* werden für Raumwärme und Warmwasser separat abgebildet. Bei WW werden dezentrale, Etagen- und zentrale Verrohrungen unterschieden. Analoges gilt für Speicher, Schaltungen und Pumpen. Bei der Raumwärmebereitstellung werden Etagen- sowie zentrale Verrohrungen (inkl. Heizkörper) sowie Speicher, Schaltungen und Pumpen unterschieden. Zudem werden (teils) fiktive dezentrale Verrohrungen modelliert. Bei RH/EFH entfallen die Etagenvarianten. Es werden zu einer Referenzfläche gehörende Investitionen samt Preisstand, enthaltenen Positionen und Modernisierungsanteilen in *AWOHM* vorgehalten. Durch das Attribut *Effizienz* können Leitungs- und Speicherverluste berücksichtigt werden. Insbesondere beim Einbau neuer Wärmeerzeuger kann die Art der existierenden Verrohrung die Anzahl und die Größe neuer Wärmeerzeuger determinieren, bzw. eine neue Verrohrung kann notwendig werden und somit zu hohen Investitionen führen.

Tabelle 35: Attribute, Kürzel, Wertebereiche und Quellen der *Stammdaten Verrohrung und Speicher vvs*

Attribut	Kürzel	Wertebereich	Quelle
ID	<i>vvs</i>	Long	Beliebig, wenn eindeutig
Anwendbarkeit in RH und EFH	-	Ja, nein	Annahmen des Autors
Anwendbarkeit in MFH (bzw. MFH_NBL)	-	Ja, nein	
Anwendbarkeit in GMH und HH (bzw. GMH_NBL und HH_NBL)	-	Ja, nein	
Ist Raumwärmeverrohrung	-	Ja, nein	
Referenzfläche	-	Double [m ²]	Staatliche Vermögens- und Hochbauverwaltung Baden-Württemberg (2006)
Investition (brutto)	<i>I_{vvs}</i>	Double [€]	
Preisstand	-	Integer [a]	
In Investition enthalten	-	String	
Modernisierungsanteil	<i>MA_{vvs}</i>	Double [€/€]	Annahmen des Autors
Effizienz	<i>η_{vvs}</i>	Double [-]	Annahmen des Autors basierend auf Pistohl (2000)

Attribute, Kürzel, Wertebereiche und Quellen der Klasse *Verrohrung und Speicher* sind in Tabelle 36 angegeben. Die Instanzen dieser Klasse spezifizieren auf Mikroebene, welche *Verrohrungs- und Speichertypen* in welcher Anzahl zu einem *Wärmeversorgungspaket* gehören und wann diese eingebaut wurden. Das Vorgehen zur Ermittlung dieser Instanzen wurde in Abschnitt 5.3.9 beschrieben.

Tabelle 36: Attribute, Kürzel, Wertebereiche und Quellen zu *Verrohrung und Speicher vv*

Attribut	Kürzel	Wertebereich	Quelle
ID	vv	Long	Beliebig, wenn eindeutig
Fremdschlüssel Stammdaten Verrohrung und Speicher	vv _{s,vv}	Long	Zugehörige Stammdaten Verrohrung und Speicher <i>vs</i>
Fremdschlüssel Wärmeversorgungs paket	-	Long	Zugehöriges Wärmeversorgungspaket <i>v</i>
Anzahl	-	Integer [Verrohrungen und Speicher]	Vgl. Tabelle 32
Baujahr	-	Integer [a]	Abgeleitet auf Basis des Baujahrs des Gebäudes (<i>Einzelgebäude</i>) und der Lebensdauer von Wärmeerzeugern (<i>sonstige Parameter</i>)

5.3.12 Bundesland, Kreis und Gemeinde

Nach der in den vorigen Abschnitten geschilderten integrierten Abbildung von Gebäudehülle, Anlagentechnik und Bewohner bzw. Eigentümer wird in diesem Abschnitt auf die räumliche Verteilung der Gebäude und Bewohner in *AWOHM* eingegangen. Die räumliche Differenzierung ist bspw. für die Bewertung von Luftschadstoffemissionen und deren Minderung, für die Identifizierung ggf. regional konzentrierter finanzieller Belastungen einkommensschwacher Haushalte sowie für die Modellierbarkeit von Umzug und Leerstand von Bedeutung. Gebäude- und Haushaltsentwicklung werden auf Basis des Mikrozensus 2006 simuliert. Für den Bestand im Jahr 2006 sind Bundesland und Gemeindegrößenklasse sowie an Eckwerte des Wohngebäudebestands angepasste Hochrechnungsfaktoren bekannt. Die Ergebnisse von *AWOHM* können nach der Anwendung der Hochrechnungsfaktoren demnach direkt nach Bundesland und Gemeindegrößenklasse differenziert betrachtet werden. Die betrachteten Gemeindegrößenklassen entsprechen dem Merkmal EF536 des Mikrozensus 2006 und sind vom Bundesland abhängig. Sie beziehen sich auf die Einwohnerzahlen der Gemeinden. Für Baden-Württemberg, Bayern, Niedersachsen, Rheinland-Pfalz, Sachsen, Schleswig-Holstein und Thüringen werden die Klassen <5.000, 5.000-19.999, 20.000-99.999, 100.000-499.999 und ≥ 500.000 , für Hessen, Nordrhein-Westfalen und Sachsen-Anhalt die Klassen <20.000, 20.000-99.999, 100.000-499.999 und ≥ 500.000 und für Brandenburg, Mecklenburg-Vorpommern und Saarland die Klassen <5.000, 5.000-19.999, 20.000-499.999 und ≥ 500.000 unterschieden. Im Falle von Berlin, Bremen und Hamburg existiert nur die Klasse ≥ 500.000 .

Neben dem SUF des Mikrozensus stehen amtliche Statistiken über Bundesländer, Kreise und Gemeinden zur Verfügung, die allerdings einen wesentlich niedrigeren Differenzierungs- bzw. Detaillierungsgrad je Haushalt und Gebäude aufweisen (vgl. Statistisches Bundesamt 2008b). Um die räumliche Auflösung im Modell zu erhöhen, werden für die einzelnen Gemeinden (und auch die Kreise) neben ID, Name, dem Bundesland und dem Kreis die Anzahl an Wohneinheiten in Wohngebäuden mit einer, zwei bzw. mindestens drei Wohneinheiten, die Gesamtwohnfläche von Wohngebäuden, die Anzahl an Wohneinheiten in Gebäuden, die Gebietsfläche, die Siedlungsfläche für das Wohnen und die Einwohnerzahl für das Jahr 2006 vorgehalten (vgl. Tabelle 37). Daten über die Altersstruktur des Wohngebäudebestands in den einzelnen Gemeinden stehen im verwendeten Datensatz nicht zur Verfügung.⁹⁰ Über die Einwohnerzahl können die Gemeinden eines Bundeslands einer Gemeindegrößenklasse zugeordnet werden.

Zur Erhöhung der räumlichen Auflösung bis zur Gemeindeebene kann die Verteilung des nach Bundesland und Gemeindegrößenklasse differenzierten Wohngebäude- und Haushaltsbestands anhand der drei Merkmale zur Anzahl der Wohneinheiten in Wohngebäuden in den Gemeinden auf Gemeindeebene abgeschätzt werden. Dabei wird implizit angenommen, dass Gebäude- und Haushaltscharakteristika für eine vorgegebene Gebäudegröße in den Gemeinden identisch verteilt sind (bspw. Altersstruktur, Beheizungsstruktur und bisherige Sanierungstätigkeit), sofern diese sich im selben Bundesland befinden und zur selben Gemeindegrößenklasse gehören. Somit können beispielsweise Luftschadstoff- und Treibhausgasemissionen sowie der nach Endenergieträgern differenziert berechnete Endenergiebedarf für jede Gemeinde in Deutschland abgeschätzt werden. Zur Aggregation der Ergebnisse können die Emissionen und der Endenergiebedarf der zu einem Kreis gehörenden Gemeinden ggf.

⁹⁰ Der Zensus 2011 differenziert zwar die Altersstruktur der Gebäude auf Gemeindeebene, stand aber erst kurz vor Abschluss dieser Arbeit zur Verfügung und wurde daher in dieser Arbeit nicht detailliert berücksichtigt.

aufsummiert und zur Bildung von vergleichbaren Kennwerten auf die Gebietsfläche, die Siedlungsfläche für Wohnzwecke oder die Einwohnerzahl bezogen werden. Attribute, Kürzel und Wertebereiche je *Bundesland*, *Kreis* und *Gemeinde* sind mit den zugehörigen Quellen in Tabelle 37 angegeben.⁹¹

Tabelle 37: Attribute, Kürzel, Wertebereiche und Quellen zu *Bundesland*, *Kreis* und *Gemeinde*; WE: Wohneinheit

Objekt	Attribut	Kürzel	Wertebereich	Quelle
Bundesland <i>pb</i> , Kreis <i>pk</i> , Ge- meinde <i>pg</i>	ID (AGS: Amtlicher Gemein- schlüssel)	<i>pb, pk, pg</i>	Long	Statistik lokal (Sta- tistisches Bundes- amt 2008b)
	Name	-	String	
	Anzahl an WE in Wohngebäuden mit 1 WE	$\#WE_{aw,pb}$, $\#WE_{aw,pk}$	Long [WE]	
	Anzahl an WE in Wohngebäuden mit 2 WE	$\#WE_{aw,pg}$ mit $aw \in AW =$	Long [WE]	
	Anzahl an WE in Wohngebäuden mit mindestens 3 WE	{1,2, ≥ 3}	Long [WE]	
	Wohnfläche in Wohngebäuden	-	Double [m ²]	
	Anzahl an WE in Gebäuden	-	Long [WE]	
	Gebietsfläche	-	Double [km ²]	
	Siedlungsfläche für Wohnzwecke	$SF_{pb}, SF_{pk}, SF_{pg}$	Double [km ²]	
	Einwohnerzahl	-	Long [Personen]	
Bundesland <i>pb</i>	Ist neues Bundesland	<i>Ost_{pb}</i>	ja, nein	
Kreis <i>pk</i>	Fremdschlüssel Bundesland	-	Long	
	NUTS3-Code (NUTS: Nomenclature of Territorial Units for Statistics)	-	String	EUROSTAT (2013)
Gemeinde <i>pg</i>	Fremdschlüssel Kreis	-	Long	Statistik lokal (Sta- tistisches Bundes- amt 2008b)
	Gemeindegrößenklasse	-	1 (<5.000), 2 (5.000-19.999), 3 (20.000-99.999), 4 (100.000-499.999), 5 (≥500.000), 6 (<20.000), 7 (20.000-499.999) [Personen]	Bestimmt basierend auf Einwohnerzahl

5.3.13 Stichprobenziehung, Leerstand und Hochrechnungsfaktoren

In den vorigen Abschnitten wurde die integrierte Abbildung des Gebäude- und Haushaltsbestands erläutert. Das SUF des Mikrozensus 2006 diente hierbei als zentrale Datenquelle, mit der andere Datenquellen kombiniert wurden. Bei

⁹¹ Zusätzlich zu den betrachteten Attributen könnten räumlich differenzierte Solarstrahlungsdaten und Heizgradtage verwendet werden, um die Unsicherheiten durch die Verwendung eines deutschlandweiten Referenzklimas zu reduzieren. Durch die Berücksichtigung der Verfügbarkeit von Gas- und Fernwärmenetzen auf Gemeindeebene könnten bestimmte Energieträgerwechsel ausgeschlossen werden.

dem SUF des Mikrozensus handelt es sich um eine Substichprobe des Mikrozensus, die, wie der Mikrozensus selbst, mittels Hochrechnungsfaktoren auf die Gesamtbevölkerung bzw. den gesamten Wohnungsbestand in Deutschland hochskaliert werden kann. In diesem Abschnitt wird nach einer Einführung in die Stichprobenziehung beim Mikrozensus auf die Wahl eines geeigneten Hochrechnungsfaktors und den Umgang mit Leerstand eingegangen.

Auswahlbezirke

Grundlage für die Stichprobenziehung beim Mikrozensus ist laut dem Statistischen Bundesamt (2005) die Aufteilung der Wohnungen in Deutschland in Auswahlbezirke (Klumpen). Ein Auswahlbezirk besteht aus benachbarten Gebäuden oder Gebäudeteilen. Gebäude mit 1-4 Wohneinheiten werden zu Auswahlbezirken mit Richtwerten von 12 Wohneinheiten zusammengefasst. Gebäude mit 5-10 Wohneinheiten bilden jeweils einen eigenen Auswahlbezirk. Gebäude mit 11 und mehr Wohneinheiten wurden in Auswahlbezirke mit Richtgröße 6 Wohneinheiten zerlegt. Abweichungen von der beschriebenen Grundausswahl, die zu durchschnittlich 9 Wohnungen je Auswahlbezirk führt, gibt es nach Jäger u. a. (2009) bei der Neubausauswahl.

(Sub-)Stichprobenziehung

Nach Jäger u. a. (2009) wird beim Mikrozensus, einer einstufigen Klumpen- bzw. Flächenstichprobe⁹², aus den Auswahlbezirken – den Primäreinheiten – eine 1%-ige Stichprobe gezogen. Erhebungseinheiten sind die in den Primäreinheiten enthaltenen sekundären Einheiten Wohnungen, Haushalte und Personen. Die 70%-ige Substichprobenziehung, die beim SUF zur faktischen Anonymisierung notwendig ist, erfolgt beim Mikrozensus mit Zusatzprogramm zur Wohnsituation als Wohnungssubstichprobe (bspw. beim Mikrozensus 2006).

⁹² Vgl. Ronning (2005) bez. Unterschieden zwischen Stichprobenverfahren.

Leerstand im Mikrozensus

Wird von den Interviewern in einer Wohnung mehrfach kein Bewohner angetroffen, und erweckt die Wohnung den Eindruck, unbewohnt zu sein, wird beim Mikrozensus eine Wohnung als leerstehend definiert (Payk 2011). Daher kann von einer Überschätzung der Leerstände im Mikrozensus ausgegangen werden. Kleinräumige Leerstandsanalysen sind nach Payk (2011) aufgrund der Stichprobengröße nicht möglich.

Beim Mikrozensus kann das Nichtvorliegen eines Datensatzes zu einer Wohnung also auf Leerstand, Nichterreichbarkeit der Bewohner oder die Beschränkung auf einen Gebäudeteil zurückgeführt werden. Ist die Zahl der Wohneinheiten im Auswahlbezirk bekannt, können Antwortausfallraten bestimmt werden, die sich auf Leerstand oder Nichterreichbarkeit der Bewohner zurückführen lassen.

Leerstand im Scientific-Use-File

Durch die 70%-ige Substichprobenziehung beim Übergang vom Primärdatensatz zum *Scientific-Use-File* kann das Nichtvorliegen von Datensätzen auch auf den Wegfall von Datensätzen zurückgeführt werden. Aussagen über die Anzahl der Wohneinheiten in einem Gebäude sind über die Merkmale EF635 und EF490 möglich (vgl. Abschnitt 5.3.4). Bei deren Kombination ist beim SUF 2006 eine Differenzierung von Gebäuden mit 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9-12, 13-20 und mehr als 20 Wohneinheiten möglich. Bei den letzten drei Kategorien kann die Wohnungsanzahl im Gebäude nur grob geschätzt werden.

Abweichungen zwischen der Anzahl von Wohnungen im Gebäude und Wohnungen mit Datensatz können also durch Leerstand, Nichterreichbarkeit der Bewohner, die Beschränkung eines Auswahlbezirks auf einen Gebäudeteil (im Falle von Gebäuden mit mindestens 11 Wohneinheiten), zu grobe Differenzierung bei der Charakterisierung der Anzahl der Wohneinheiten im Gebäude oder die Substichprobenziehung zurückgeführt werden. Auf Basis des SUF 2006 können somit keine Aussagen bez. Leerstandsdaten getroffen werden.

Hochrechnung auf Gebäudeebene

Eine Abschätzung der Gesamtwohnfläche eines Gebäudes kann auf Basis der Anzahl der Wohnungen im Gebäude gemacht werden, indem angenommen wird, dass nicht durch das SUF 2006 abgedeckte Wohnungen im Mittel dieselbe Größe wie abgedeckte Wohnungen haben. Aussagen über den Leerstand können hierbei allerdings nicht gemacht werden. Insbesondere bei größeren Gebäuden kann es durch die grobe Charakterisierung der Anzahl der Wohneinheiten zu größeren Abweichungen kommen. Auf Basis der Gesamtwohnfläche können dann Bauteilflächen, Volumina, Nutzenergiebedarf, Endenergiebedarf, Emissionen, Investitionen etc. auf Gebäudeebene geschätzt werden.

Hochrechnung auf den Haushalts- und Wohnungsbestand in Deutschland

Im SUF stehen je Datensatz mehrere Hochrechnungsfaktoren zur Verfügung. Die für die vorliegende Arbeit relevanten Faktoren sind die für die Jahresauswertungen des Grundprogramms (EF952) und für die Jahresauswertungen zur Wohnsituation des Haushalts (EF960) (vgl. Statistisches Bundesamt 2008c).

Nach Jäger u. a. (2009) erfolgt die Bestimmung der Hochrechnungsfaktoren in beiden Fällen zweistufig. In der ersten Stufe erfolgt eine Korrektur der nicht erreichten Haushalte. In der zweiten Stufe erfolgt für EF952 auf der Ebene von 123 Anpassungsschichten eine Anpassung an demographische Randverteilungen (Alter, Staatsangehörigkeit, Geschlecht), welche aus der laufenden Bevölkerungsfortschreibung und dem Ausländerzentralregister stammen. Für EF960 werden in der zweiten Stufe stattdessen Eckwerte der laufenden Wohnungsfortschreibung (Wohnungen in Wohn- und Nichtwohngebäuden) zur Anpassung auf regionaler Ebene herangezogen.

In *AWOHM* erfolgt die Modellierung der Bewohner jeweils über den Haupteinkommensbezieher und die Haushaltseigenschaften. Da primär Aussagen über den Gebäudebestand und sekundär über die Bewohner abgeleitet werden sollen, wurde der Hochrechnungsfaktor EF960 herangezogen (vgl. Abschnitt 5.3.2). Im Vergleich zu Aussagen über den Gebäudebestand sind Aussagen

über den Haushaltsbestand daher kritischer zu hinterfragen, da diesbezüglich keine Anpassung an demographische Randverteilungen erfolgte.

Leerstand bei der Hochrechnung auf den Wohnungsbestand in Deutschland

Durch die Anpassung der hochgerechneten Werte an die Eckwerte der laufenden Wohnungsfortschreibung, bei der auch leerstehende Wohnungen enthalten sind, sind leerstehende Wohnungen im mit EF960 hochgerechneten Wohnungsbestand enthalten. Daher wurde bei der Klasse *Einzelgebäude* in Abschnitt 5.3.2 neben dem Hochrechnungsfaktor auch der Anteil des Leerstands am Hochrechnungsfaktor eingeführt. Dieser Anteil wird auf Basis der Fachserie 5 des Statistischen Bundesamts (2006-2010) bei der Ableitung des Startbestands berücksichtigt. Dabei werden die in Tabelle 38 angegebenen, nach Bundesländern differenzierten Leerstandsquoten verwendet. Beim Abriss und Neubau von Gebäuden sowie dem Umzug oder der Veränderung von Haushalten können sich sowohl der Hochrechnungsfaktor als auch der Anteil des Leerstands am Hochrechnungsfaktor ändern (vgl. Abschnitte 5.4 und 5.5).

Tabelle 38: Leerstandsquoten differenziert nach Bundesländern im Jahr 2006 (in Anlehnung an: Stengel u. a. 2012; Datengrundlage: Statistisches Bundesamt 2006-2010)

Bundesland	Leerstand [Wohneinheit pro Wohneinheit]
Baden-Württemberg	7,0%
Bayern	6,7%
Berlin	8,8%
Brandenburg	11,5%
Bremen ohne Bremerhaven	4,2%
Hamburg	4,5%
Hessen	6,0%
Mecklenburg-Vorpommern	11,3%
Niedersachsen einschl. Bremerhaven	5,5%
Nordrhein-Westfalen	7,9%
Rheinland-Pfalz	8,0%
Saarland	8,4%
Sachsen	14,6%
Sachsen-Anhalt	16,6%
Schleswig-Holstein	5,3%
Thüringen	10,5%

5.4 Modellierung der Gebäudebestandsveränderung

Im vorigen Abschnitt wurde die Modelldatenstruktur zur integrierten Abbildung des Wohngebäude- und Haushaltsbestands in einem Jahr t sowie die Ermittlung des Startbestands für das Startjahr 2006 der Simulation beschrieben. Bei einer Simulation bis zum Jahr 2030 unterliegen Wohngebäude, Haushalte sowie deren Zusammenhänge Veränderungen. Das im Rahmen dieser Arbeit entwickelte aktorsbasierte Wohngebäude- und Haushaltsmodell *AWOHM* erweitert den Betrachtungsgegenstand der Wohngebäudebestandsmodelle, ausgehend von der reinen Gebäudebetrachtung, um die aktorsbasierte Bewohner- und Eigentümerbetrachtung. In diesem Abschnitt wird auf die Modellierung der jährlichen Gebäudebestandsveränderung bis zum Jahr 2030 eingegangen. Die Modellierung der Haushaltsbestandsveränderung wird in Abschnitt 5.5 beschrieben.

Nach einer Übersicht über die Arten der Gebäudebestandsveränderungen in Abschnitt 5.4.1 werden die (aus technischer Sicht) erreichbaren Sanierungsvarianten in Abschnitt 5.4.2 erläutert. Danach werden in den Abschnitten 5.4.3 und 5.4.4 als Basis für Sanierungsentscheidungsmodelle dienende Indikatoren sowie deren Aggregation zu einem Nutzenwert formal und inhaltlich beschrieben. In Abschnitt 5.4.4 wird dabei differenziert nach Eigentümerstrukturen, in Anlehnung an Kapitel 4, auf die konkreten Parametrisierungen der Sanierungsentscheidungsmodelle und der Entscheidungsansätze eingegangen, anhand derer die Sanierungsentscheidung bei der Modellanwendung in Kapitel 7 simuliert wird. Abschließend wird die Modellierung von Abbruch und Neubau in den Abschnitten 5.4.5 und 5.4.6 erläutert.

5.4.1 Überblick

Wohngebäude unterliegen Abnutzungsprozessen, werden saniert bzw. modernisiert, umgenutzt und abgerissen oder sie werden neu errichtet. Umweltpolitische Instrumente im Bereich der Energienutzung in Wohngebäuden zielen meist auf eine Verminderung der Treibhausgas- und Luftschadstoffemissi-

onen sowie des Primärenergieverbrauchs ab. Da bei einem Betrachtungszeitraum bis 2030 diesbezügliche Potenziale im Bereich Raumwärme und Warmwasser überwiegend im Gebäudebestand liegen (vgl. Matthes u. a. 2013), wurde der Schwerpunkt der Modellierung auf die energetische Sanierung von Wohngebäuden gesetzt. Umbaugewinne und die Umnutzung von Gebäuden werden aufgrund ihrer mengenmäßig untergeordneten Bedeutung nicht betrachtet (vgl. für die Schweiz mit Kost 2006). Neubau und Abbruch werden ergänzend berücksichtigt.

Die Modellierung der energetischen Sanierung setzt dabei auf dem *Bottom-Up*-Modell des Wohngebäude- und Haushaltsbestands für das Jahr 2006 auf. Eine Sanierung wird in *AWOHH* durch den Sanierungszeitpunkt und die gewählte Sanierungsvariante determiniert. Eine Sanierungsvariante umfasst dabei ein *Hüllenpaket* und ein *Wärmeversorgungspaket*. Die potenziellen Sanierungszeitpunkte werden durch Sanierungszyklen bestimmt.⁹³ Basierend auf dem Baujahr bzw. der letzten Sanierung eines Gebäudes wird angenommen, dass die Anlagentechnik regelmäßig nach Ablauf ihrer Lebensdauer (Lebensdauer der *Wärmeerzeuger*), bspw. alle 20 Jahre in Anlehnung an VDI 2067 (2000), ausgetauscht werden muss.⁹⁴ Gleiches gilt für die Sanierung der Gebäudehülle, bspw. alle 40 Jahre in Anlehnung an BMVBW (2001), mit der Einschränkung, dass derartige Sanierungen nicht immer durchgeführt werden, bzw. die durch-

⁹³ Da Sanierungsanlässe und -zeitpunkte nicht nur von den Lebenszyklen der Gebäude und Bauteile, sondern auch von denjenigen der Eigentümer und Bewohner abhängen, ermöglicht der Ansatz nur eine erste Schätzung, die durch die zusätzliche Einbeziehung von Informationen zu Eigentümern und Bewohnern ggf. verbessert werden kann. Aufgrund der Datenlage wird darauf in dieser Arbeit jedoch verzichtet. *AWOHH* stellt zwar Bewohnerinformationen bereit und ermöglicht dadurch entsprechende Erweiterungen, aber hinsichtlich der induzierten Sanierungsaktivität und dem zugehörigen Sanierungszeitpunkt besteht in empirischer Hinsicht zunächst noch Forschungsbedarf.

⁹⁴ Die Alterungsprozesse könnten auch stochastisch simuliert werden, wie bspw. bei Hansen (2009a). Dies liegt jedoch nicht im Fokus der vorliegenden Arbeit. Eine vergleichbare „Streuung“ der Ergebnisse wird bei *AWOHH* allerdings durch eine mit über 100.000 relativ hohe Gebäudeanzahl mit individuellen Bau- bzw. Sanierungsjahren erreicht.

geführten Sanierungen nicht immer die Energieeffizienz verändern. Daher sind diese Sanierungszeitpunkte „potenziell“. Dieser Sachverhalt wird bei der Bestimmung bzw. der Auswahl der Sanierungsvarianten berücksichtigt, die durch die Gebäudeeigentümer auf Basis einer multikriteriellen Nutzenfunktion vorgenommen wird. Wird ein Gebäude, das zur Sanierung ansteht, nicht energetisch saniert, so besteht im Modell erst nach Ablauf des folgenden Sanierungszyklus wieder die Möglichkeit einer energetischen Sanierung.

Die Sanierungsentscheidung, d. h. die Auswahl einer Sanierungsvariante aus der (endlichen) Menge erreichbarer Sanierungsvarianten, wird aktorsbasiert über Sanierungsentscheidungsmodelle simuliert. Die Akteure entsprechen dabei den Gebäudeeigentümern, die auf Basis einer multikriteriellen Nutzenfunktion entscheiden. Die Menge erreichbarer Sanierungsvarianten ergibt sich aus den im Modell hinterlegten Typen⁹⁵ für den oberen und unteren Gebäudeabschluss, Außenwände, Fenster, Wärmeerzeuger, Verrohrungen und Speicher sowie Energieträgerverfügbarkeiten. Die Erreichbarkeit von Sanierungsvarianten wird durch die vorherige Konfiguration des Gebäudes eingeschränkt, bspw. indem bestimmte Energieträgerwechsel ausgeschlossen werden. Die eigentliche Entscheidung für eine der erreichbaren Sanierungsvarianten wird in einem flexiblen, szenariobasierten Ansatz auf einen Satz von Indikatoren zurückgeführt, der Sanierungsmotive und -hemmnisse (vgl. Kapitel 4) operationalisiert. Diese Indikatoren charakterisieren die erreichbaren Sanierungsvarianten in Hinsicht auf ökonomische, ökologische und sonstige Auswirkungen sowie Hemmnisse. Die Indikatoren werden ggf. normiert, gewichtet und zu einem Nutzenwert aggregiert, auf dessen Basis die Wahl der Sanierungsvariante erfolgt. Sowohl die Erreichbarkeit der Sanierungsvarianten als auch die Indikatoren können durch umweltpolitische Instrumente beeinflusst werden.

Die Gewichtungen der Indikatoren werden in Szenarien jeweils für unterschiedliche Eigentumsstrukturen und für unterschiedliche Sichtweisen gesetzt.

⁹⁵ Teilweise handelt es sich nicht um „neue Bauteile“, sondern um eine Modernisierung (bspw. Dämmung) existierender Bauteile.

Als Eigentumsstrukturen werden Selbstnutzer, Eigentümergemeinschaften, Amateurvermieter im Gebäude, Amateurvermieter nicht im Gebäude sowie professionelle und institutionelle Vermieter differenziert. Als Sichtweisen werden die Potenzialsichtweise und die Eigentümersichtweise unterschieden. Die Potenzialsichtweise, bspw. als Sicht der Legislative, dient dazu, durch entsprechende Gewichtungen der Indikatoren, technische und ökonomische Potenziale zu bestimmen. Dadurch können *Benchmarks* erzeugt, Bündel umweltpolitischer Instrumente bewertet und daraus ggf. geeignete Mindestanforderungen und Förderschemata abgeleitet werden. Die Eigentümersichtweise dient dazu, nach den technischen und ökonomischen Potenzialen auch die ausschöpfbaren Potenziale und deren Sensitivität hinsichtlich der Einstellungen der Gebäudeeigentümer abzuschätzen. Bei der Eigentümersichtweise werden zwei Ansätze verfolgt, ein *annahmenbasierter* Ansatz und ein *empirisch basierter* Ansatz (vgl. Kapitel 3). Bei dem *annahmenbasierten* Ansatz werden für jede Eigentumsstruktur transparente Entscheidertypen und -strategien definiert. Nach einer zufallsziehungs-basierten, teils empirisch gestützten Zuordnung der konkreten Entscheider zu den Entscheidertypen bzw. -strategien können dann ausschöpfbare Potenziale abgeschätzt werden. Aufgrund der hohen Unsicherheit bei einer derartigen Typisierung menschlichen Verhaltens wird in Extremstrategien auch analysiert, welche Abweichungen sich bei vollständiger Entscheidung gemäß den einzelnen Entscheidertypen und -strategien ergeben. Der *empirisch basierte* Ansatz (vgl. Kapitel 3) ist auf Selbstnutzer beschränkt, da er auf Parameterschätzungen aus der Literatur basiert, und diese für andere Eigentumsstrukturen nicht verfügbar sind.

Durch den Abbruch von Gebäuden werden häufig Gebäude mit unterdurchschnittlicher Energieeffizienz aus dem Bestand eliminiert, und der verfügbare Wohnraum sinkt. Es wird angenommen, dass nur leerstehende Gebäude abgebrochen bzw. zurückgebaut werden. Die Abbruchraten werden auf den Leerstand bezogen exogen vorgegeben. Durch den Neubau von Gebäuden wird zusätzlicher Wohnraum geschaffen. Die Anzahl von Neubauten pro Jahr wird

nach Gebäudetyp sowie räumlich differenziert vorgegeben. Energieeffizienz und Energieträgerverteilung von Neubauten orientieren sich dabei an den umweltpolitischen Instrumenten, den Charakteristika der Neubauten in der Baualtersklasse von 2002 bis 2006 sowie aktuellen Entwicklungen.

5.4.2 Erreichbare Sanierungsvarianten

Eine Sanierungsvariante umfasst ein Hüllenpaket und ein Wärmeversorgungspaket. In *AWOHM* kann prinzipiell jedes Hüllenpaket mit jedem Wärmeversorgungspaket kombiniert werden. Falls die Sanierungszeitpunkte, die basierend auf dem Baujahr bzw. Einbaujahr und den erwarteten Lebensdauern von Gebäudehülle und Anlagentechnik bestimmt werden, nicht zusammenfallen, wird allerdings das existierende Wärmeversorgungspaket bzw. Hüllenpaket beibehalten. Die rechtliche Zulässigkeit der Sanierungsvarianten wird einerseits über Einschränkungen der Erreichbarkeit von Sanierungsvarianten und andererseits über Indikatoren berücksichtigt. Bspw. wird durch die Vorgabe maximaler Wärmedurchgangskoeffizienten für Außenwände im Falle von Sanierungen die Erreichbarkeit von Sanierungsvarianten eingeschränkt. Ob die Außenwand allerdings gemäß dieser Mindestanforderung oder überhaupt nicht gedämmt wird, wird durch den Indikator „*illegale*“ Variante (vgl. Abschnitt 5.4.3) und weitere bspw. die ökonomische Vorteilhaftigkeit operationalisierende Indikatoren beeinflusst.

5.4.2.1 Hüllenpaket

Die auswählbaren Hüllenpakete setzen sich jeweils aus je einer Variante für die Dämmung des oberen Gebäudeabschlusses, der Außenwände und des unteren Gebäudeabschlusses sowie für die Fenster zusammen. Dabei sind in *AWOHM* grundsätzlich alle Kombinationen möglich. Einschränkungen können sich jedoch durch Mindestanforderungen oder bautechnische Anforderungen ergeben. Die jeweiligen Varianten sind in Tabelle 24 (vgl. Abschnitt 5.3.7) angegeben. Bei den energetischen Sanierungen der Gebäudehülle nach dem Startjahr der Simulation (2006) werden je Gebäudetyp, Baualtersklasse und

Bauteil maximal vier Varianten unterschieden, nämlich 2007-2008 (Kürzel: +), 2007-2030a (++) , 2007-2030b (+++) und 2007-2030c (++++). Diese stellen Einzelmaßnahmen für Außenwandflächen (vier Varianten), oberen Gebäudeabschluss (vier Varianten), unteren Gebäudeabschluss (vier Varianten) und Fenster (drei Varianten) dar. Die Varianten orientieren sich an der EnEV 2007, der EnEV 2009, der *EnEV 2009-30%* und der *EnEV 2009-50%*⁹⁶.

Eine vorzeitige Dämmung ist häufig nicht wirtschaftlich und nicht gesetzlich vorgeschrieben⁹⁷. Eine vorzeitige Sanierung wird daher, und um die Variantenvielfalt möglicher Sanierungen bzw. Sanierungspakete einzuschränken, von der Betrachtung ausgeschlossen. Dadurch kann die Rechenzeit für *AWOHM*-Modellläufe reduziert werden. Umgesetzt wird dies, indem die energetische Sanierung der gesamten Gebäudehülle inkl. des unteren Gebäudeabschlusses in notwendiger jedoch nicht hinreichender Weise an eine einheitliche technische Lebensdauer von 40 Jahren bzw. je nach Szenario 30-50 Jahren (in Anlehnung an BMVBW, 2001) gebunden ist.

Die zu den Bauteilvarianten gehörigen Investitionen umfassen im Falle der Außenwände und des oberen Gebäudeabschlusses die durch die Dämmung (Montage und Material) verursachten Mehrinvestitionen im Vergleich zur Instandsetzung ohne energetische Verbesserung. Es wird angenommen, dass eine Instandsetzung, wie bspw. die Erneuerung des Außenputzes, ohnehin alle 30-50 Jahre (in Anlehnung an BMVBW (2001)) durchgeführt wird. Eine energetische Verbesserung von Außenwänden und dem oberen Gebäudeabschluss muss dann gemäß der Energieeinsparverordnung 2009 (vgl. EnEV 2009), je nach Ausgangszustand, unter bestimmten Voraussetzungen zusätzlich durchgeführt werden. Ein Austausch der Fenster ist typischerweise mit einer energetischen Verbesserung verbunden, sodass die Quantifizierung der energetisch

⁹⁶ Darunter sind um ca. 30% bzw. ca. 50% reduzierte Wärmedurchgangskoeffizienten bei der Sanierung zu verstehen.

⁹⁷ Eine Ausnahme stellt die grundsätzliche Nachrüstverpflichtung der Dämmung der obersten Geschossdecke bzw. des Dachs dar (vgl. EnEV 2009).

bedingten Mehrinvestition große Unsicherheiten aufweist. Modernisierungsanteile von Fenstern werden zwischen 10% und 25% angegeben (vgl. Knissel u. a. 2010; Verhoog 2012). Im Folgenden wird die energetisch bedingte Mehrinvestition für die Fenstervarianten + bzw. ++ auf 10% der Gesamtinvestition (Montage und Material) exkl. Ausbau und Entsorgung der alten Fenster gesetzt. Für die Fenstervarianten +++ und ++++ wird jeweils zusätzlich die Differenz der Gesamtinvestition im Vergleich zur Variante + bzw. ++ angesetzt. Im Falle des unteren Gebäudeabschlusses werden die Gesamtinvestitionen (Montage und Material) betrachtet, da diese Energieeffizienzmaßnahmen nicht unbedingt an allgemeine Instandhaltungs- bzw. Instandsetzungsmaßnahmen gekoppelt sind. Die im Modell verwendeten bauteilflächenspezifischen energiebedingten Mehrinvestitionen sind in Tabelle 39 angegeben.

Tabelle 39: Bauteilflächenspezifische energiebedingte Mehrinvestitionen (einschließlich Montage) für die energetische Sanierung der Gebäudehülle in den Varianten 2007-2008 (+), 2007-2030a (++) , 2007-2030b (+++), 2007-2030c (++++) im Jahr 2009 (in Anlehnung an: Stengel u. a. 2012; Datengrundlage: BKI 2010)

Gebäudetyp	Energiebedingte Mehrinvestitionen [€/m ²] (netto, Stand 1. Quartal 2009)															
	Oberer Gebäudeabschluss				Außenwände				Unterer Gebäudeabschluss				Fenster			
	+	++	+++	++++	+	++	+++	++++	+	++	+++	++++	+	++	+++	++++
HH, HH_NBL	20	24	45	47	50	59	61	64	13	15	16	17	23	23	46	136
Sonstiger Massivbau	14	17	18	19	49	58										
Fachwerk					34	40	42	44								

Da prinzipiell auch eine Nichtdurchführung der energetischen Modernisierung bzw. des Fensteraustauschs möglich ist und praktiziert wird, ergeben sich je Gebäude $(4+1)^3 \times (3+1) = 500$ mögliche Hüllenpakete⁹⁸. Die jeweiligen Attribute der potenziellen Varianten des oberen Gebäudeabschlusses, der Fenster, der Außenwände und des unteren Gebäudeabschlusses (vgl. Tabelle 25 in Abschnitt 5.3.7) sind ebenfalls in *AWOHM* hinterlegt. Die Varianten werden im Modell einerseits über die Attribute *Sanierungsjahr von* und *Sanierungsjahr bis* allgemein sowie über die booleschen Anwendbarkeitsattribute für be-

⁹⁸ Auf eine Einschränkung der möglichen Hüllenpakete hinsichtlich bautechnischer Anforderungen wurde in dieser Arbeit verzichtet.

stimmte Gebäudetypen eingeschränkt. Andererseits können Mindestanforderungen die jeweiligen Bauteilvarianten einschränken (vgl. Abschnitt 5.6.3). Wird in *AWOHM* eine Veränderung am *Hüllenpaket* eines *Einzelgebäudes* vorgenommen, so wird ein neues *Hüllenpaket* (vgl. Tabelle 22) mit den jeweiligen Fremdschlüsseln und Einbaujahren der Bauteile sowie einem Verweis auf das vorige *Hüllenpaket* erzeugt. Zudem werden beim *Einzelgebäude* (vgl. Tabelle 18) der Fremdschlüssel auf dieses neue *Hüllenpaket* gesetzt und die getätigten Investitionen für das *Hüllenpaket* gespeichert.

5.4.2.2 Wärmeversorgungspakete

Die auswählbaren bzw. erreichbaren Wärmeversorgungspakete umfassen *Wärmeerzeuger*, *Energieträgerverfügbarkeit* sowie *Verrohrung und Speicher*. Die Erreichbarkeit der Wärmeversorgungspakete hängt von der vorhergehenden *Energieträgerverfügbarkeit* sowie den vorhergehenden *Verrohrungen und Speichern* ab. So kann bspw. der in der Realität kaum zu beobachtende Wechsel von Gas zu Kohle oder Heizöl als Energieträger sowie der Wechsel von einer Zentralheizung zu Einzel- oder Mehrraumöfen unterbunden werden. Energieträgerwechsel und Wechsel in der Zentralität der Wärmeversorgung sind nicht zuletzt wegen teils beträchtlicher Investitionen aus ökonomischer Sicht von Bedeutung.

Da Hochtemperaturkessel mit Mischer nach EnEV 2009 nicht mehr zulässig sind, werden für die Endenergieträger Gas und Heizöl in *AWOHM* nur Niedertemperaturkessel und Brennwertkessel unterschieden. Für den Endenergieträger Holz bzw. Holzpellets werden Holzpelletkessel ohne und mit Partikelabscheider zur Reduktion von Feinstaubemissionen betrachtet. Für den Endenergieträger Fernwärme können Wärmeübertrager eingebaut werden. Für den Endenergieträger Elektrizität werden monovalente Wärmepumpen für den Neubau berücksichtigt. Für die Warmwasserbereitung sind elektrische Durchlauferhitzer sowie als solarthermische Unterstützung Flach- und Röhrenkollektoren einsetzbar. Andere Wärmeerzeuger wie Blockheizkraftwerke, Mikro-Kraft-Wärme-Kopplungsanlagen und Wärmepumpen werden derzeit in

AWOHM für Bestandsgebäude nicht berücksichtigt. Die Investitionen in die *Wärmeerzeuger* (vgl. Anhang A.1) umfassen bspw. bei Fernwärme sowie Öl-, Gas- und Holzpelletkesseln die Wärmeübergabestation bzw. die Heizkesselanlage sowie Entleeren, Füllen und Entlüften der Heizungsanlage. Bei Solar- und Flachkollektoren werden die thermischen Solaranlagen zur Warmwasserbereitung berücksichtigt.

Die Obermenge aller potenziellen Wärmeversorgungspakete kann anhand der Klasse *potenzielle Wärmeversorgungspakete* mit den in Tabelle 40 angegebenen Attributen dargestellt werden. Jede Instanz dieser Klasse spezifiziert ein Wärmeversorgungspaket, das im Falle eines Austauschs der Anlagentechnik eingebaut werden kann. Es werden analog zu den Anlagentechnikvarianten im Bestand die drei nach Gebäudetypen differenzierten Leistungsklassen RH/EFH (<25 kW), MFH/MFH_NBL (25-50 kW) und GMH/GMH_NBL/HH/HH_NBL (50-1.000 kW) unterschieden, anhand derer die Anwendbarkeit eines Wärmeversorgungspakets in Abhängigkeit von den Gebäudetypen eingeschränkt wird. Da 893 Instanzen der zu Tabelle 40 gehörigen Klasse existieren, wird auf eine vollständige Darstellung verzichtet und im Folgenden nur auf die wichtigsten, der Zuordnung zugrundeliegenden Prinzipien eingegangen.

Tabelle 40: Attribute, Wertebereiche und Quellen der Klasse *potenzielle Wärmeversorgungspakete* als Obermenge der bei der Sanierung zur Verfügung stehenden Wärmeversorgungspakete; FS: Fremdschlüssel

Attribut	Wertebereich	Quelle
ID	Long	Beliebig, wenn eindeutig
Leistungsklasse des Gebäudes	1-3	Abgeleitet vom Gebäudetyp
FS Verrohrung Raumheizung	Long	Zugehörige Stammdaten Verrohrung und Speicher <i>vs</i>
FS Verrohrung WW		
FS Wärmeerzeuger Raumheizung Haupt	Long	Zugehörige Stammdaten Wärmeerzeuger <i>vs</i>
FS Wärmeerzeuger WW Haupt		
FS Wärmeerzeuger WW Neben		
FS Wärmeerzeuger Raumheizung-WW-Kombi Haupt		
FS Wärmeerzeuger Raumheizung-WW-Kombi Neben		
FS Energieträger 1	Long	Zugehörige Stammdaten Energieträgerverfügbarkeit <i>vs</i>
FS Energieträger 2		
FS Energieträger 3		
FS Energieträger 4		

Prinzipiell sind in *AWOHM* alle Kombinationen aus dezentraler, Etagen- und zentraler Verrohrung für die Raumheizung sowie dezentraler, Etagen- und zentraler Verrohrung für die Warmwasserbereitung möglich. Die jeweiligen Voraussetzungen in Hinsicht auf die Verrohrung werden über die *Fremdschlüssel Verrohrung Raumheizung* und *Fremdschlüssel Verrohrung WW* spezifiziert. Die Instanzen der Klasse *potenzielle Wärmeversorgungspakete* werden primär auf Basis der *Stammdaten Wärmeerzeuger* abgeleitet (vgl. Tabelle 27). Über das boolesche Attribut *verbaubar* werden zunächst die prinzipiell zugelassenen Wärmeerzeuger identifiziert. Über die booleschen Attribute *kompatibel mit Raumheizung dezentral/Etage/zentral*, *Raumwärme- und WW-Bereitung dezentral/Etage/zentral*, *WW-Bereitung dezentral/Etage/zentral* sowie *möglicher Hauptversorger* können für die jeweiligen Verrohrungskombinationen die verbaubaren Hauptwärmeerzeuger identifiziert werden. Gleiches gilt für Nebenwärmeerzeuger über das boolesche Attribut *möglicher Nebenversorger* (nur Solarthermie bei Warmwasserbereitung berücksichtigt). Für die erforderlichen Wärmeerzeugerleistungsklassen gilt analog zur Ermittlung des Startbestands, dass für die zentrale Raumwärmebereitstellung bzw. die kombinierte zentrale Raumwärme- und Warmwasserbereitstellung der Gebäudetyp ausschlaggebend ist. Ansonsten wird die geringste Leistungsklasse unterstellt. Die Anzahl der benötigten *Wärmeerzeuger* sowie *Verrohrungen und Speicher* wird ebenfalls analog zur Ermittlung des Startbestands abgeschätzt. Es ist eine kombinierte und getrennte Raumwärme-Warmwasserbereitung für Haupt- und Nebenwärmeerzeuger zulässig. Als Nebenwärmeerzeuger wird allerdings derzeit nur die solarthermische Unterstützung bei der Warmwasserbereitung berücksichtigt. Die entsprechenden Fremdschlüssel zu den verwendeten Wärmeerzeugertypen, d. h. *Stammdaten Wärmeerzeuger*, werden über die *Fremdschlüssel Wärmeerzeuger Raumheizung Haupt*, *Wärmeerzeuger WW Haupt/Neben* und *Wärmeerzeuger Raumheizung-WW-Kombi Haupt/Neben* spezifiziert. Die in einem Wärmeversorgungspaket eingesetzten Energieträger gehen ebenfalls aus den *Stammdaten Wärmeerzeuger* hervor, sodass davon abgeleitet die Fremdschlüssel zu erfor-

derlichen *Stammdaten* *Energieträgerverfügbarkeit* über *Fremdschlüssel* *Energieträger 1, 2, 3 und 4* spezifiziert werden können.

Für jedes *potenzielle Wärmeversorgungspaket* ist damit über Fremdschlüssel klar spezifiziert, welche Energieträger und welche Verrohrungen erforderlich sind. Welche dieser *Wärmeversorgungspakete* bei der Sanierung eines konkreten *Einzelgebäudes* eingesetzt werden können, hängt von der vorhergehenden und erreichbaren *Energieträgerverfügbarkeit* sowie den vorhergehenden und erreichbaren *Verrohrungen und Speichern* ab. Die Erreichbarkeit wird hierbei basierend auf dem vorherigen Zustand über zulässige Wechsel – die allerdings mit Investitionen und teilweise mit Demontage- und Entsorgungsausgaben verbunden sind – bestimmt. Unabhängig von den rechtlichen Rahmenbedingungen und der Wirtschaftlichkeit von Alternativen sind in Deutschland bestimmte Übergänge zwischen Wärmeversorgungspaketen, wie der Wechsel von Heizöl zu Kohle, in der Realität kaum vorstellbar. Dies kann zumindest teilweise mit mangelndem Komfort bspw. für die Befuerung von Kohleöfen begründet werden. Daher sind im Modell nur bestimmte Energieträgerwechsel und Verrohrungswechsel zugelassen, die im Folgenden erläutert werden.

In Bezug auf *Verrohrung und Speicher* kann bei Raumwärme und Warmwasser entweder der aktuelle Stand beibehalten werden, oder es sind jeweils Wechsel von dezentral zu Etage oder zentral bzw. von Etage zu zentral zulässig. Nach Stengel u. a. (2012) umfassen die bei einem Wechsel von dezentraler zu Etagen- oder zentraler Raumwärmeversorgung notwendigen Investitionen u. a. Kupferrohre mit Mineralwollendämmung sowie Röhrenheizkörper und betragen im Jahr 2006 wohnflächenspezifisch 61 €/m² (netto) für RH und EFH (9.136 €/Gebäude mit 150 m² Wohnfläche), 46 €/m² für MFH und MFH_NBL (46.416 €/Gebäude mit 1.000 m² Wohnfläche) sowie 45 €/m² für GMH, GMH_NBL, HH und HH_NBL (225.467 €/Gebäude mit 5.000 m² Wohnfläche) (Staatliche Vermögens- und Hochbauverwaltung Baden-Württemberg 2006). Nach Stengel u. a. (2012) umfassen die bei einem Wechsel von dezentraler zu Etagen- oder zentraler Warmwasserversorgung notwendigen Investitionen

u. a. Trinkwarmwasserspeicher, Schaltungen und Regelungen als Pumpenschaltung.⁹⁹ Diese betragen im Jahr 2006 wohnflächenspezifisch 21 €/m² (netto) für RH und EFH (3.190 €/Gebäude mit 150 m² Wohnfläche), 5 €/m² für MFH und MFH_NBL (5.190 €/Gebäude mit 1.000 m² Wohnfläche) sowie 2 €/m² für GMH, GMH_NBL, HH und HH_NBL (8.672 €/Gebäude mit 5.000 m² Wohnfläche) (Staatliche Vermögens- und Hochbauverwaltung Baden-Württemberg 2006).

In Bezug auf die *Energieträgerverfügbarkeit* sind in *AWOHM* die in Abbildung 13 dargestellten Energieträgerwechsel (in Bestandsgebäuden) für die Raumheizung möglich. Bei einem Energieträgerwechsel zu Heizöl ist ein neuer Tank zu installieren und bei einem Wechsel weg von Heizöl fallen als Investitionen interpretierbare Ausgaben für die Demontage und die Entsorgung des alten Tanks an. Beim Wechsel zu Holzpellets – einer Sonderform des Energieträgers *Holz und sonstige erneuerbare Energieträger*, die durch den *Wärmeerzeuger* determiniert wird – sind Sacksilos und Fördereinrichtungen notwendig. Diese werden auch benötigt, falls vor der Sanierung zwar der Energieträger *Holz und sonstige erneuerbare Energieträger*, aber keine Holzpellets verwendet wurden. In diesem Falle wurde bei der Erstellung des Startbestands ein Festbrennstofflager (ausschließlich Holzpellets) als *Energieträgerverfügbarkeit* angesetzt. Bei einem Wechsel zu Gas wird angenommen, dass ein Erdgasanschluss installiert werden kann.¹⁰⁰ Ein Wechsel von bzw. zu Fernwärme wird wegen fehlender flächendeckender Informationen über die Fernwärmeverfügbarkeit nicht betrachtet. Zumal da für eine adäquate Berücksichtigung des Wechsels zu Fernwärme eine räumliche Auflösung bis zu Straßenzügen notwendig wäre.

⁹⁹ Die eigentlichen Änderungen an der WW-Verrohrung wurden hier nicht berücksichtigt.

¹⁰⁰ Für Flüssiggas werden dadurch implizit dieselben Investitionen und Brennstoffpreise unterstellt.

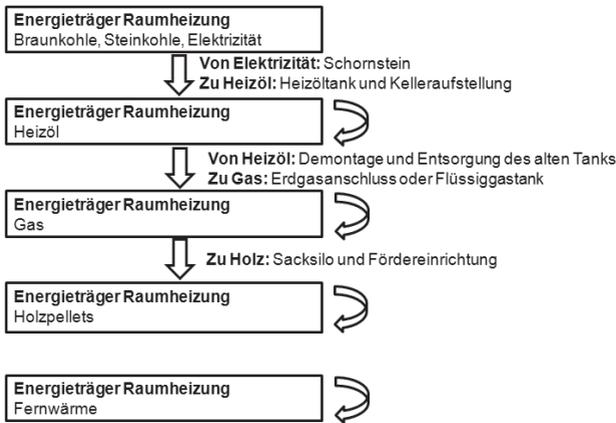


Abbildung 13: Zulässige Energieträgerwechsel für die Raumheizung (in Anlehnung an: Stengel u. a. 2012)

Die durch einen Energieträgerwechsel bedingten Investitionen sind in Tabelle 41 angegeben. Bei den Investitionen, die durch einen Zentralitätswechsel oder einen Energieträgerwechsel bedingt sind, werden in *AWOHM*, wie bei der Leistungsklasse, die gebäudebezogenen Werte und nicht die wohinflächenspezifischen Werte verwendet. In *AWOHM* werden keine Energieträgerwechselinvestitionen angesetzt, wenn die vor der Sanierung verfügbaren Energieträger beibehalten werden. Bei der Warmwasserbereitstellung ist zusätzlich zu Energieträgerwechseln wie bei der Raumheizung zudem noch eine Nutzung von Solarenergie¹⁰¹ und Elektrizität möglich. Dabei werden keine Investitionen für Energieträgerwechsel angesetzt.

Die für das beschriebene Vorgehen erforderlichen Attributwerte der *Stammdaten Wärmeerzeuger*, *Stammdaten Energieträgerverfügbarkeit* sowie *Stammdaten Verrohrung und Speicher* (vgl. Tabelle 27, Tabelle 33 und Tabelle 35), wie bspw. die Investitionen, sind ebenfalls in *AWOHM* hinterlegt. Wird im Mo-

¹⁰¹ Die Abhängigkeit der solaren Einstrahlung von der geographischen Lage und der Ausrichtung der Gebäude wird nicht berücksichtigt.

dell eine Veränderung am *Wärmeversorgungspaket* eines *Einzelgebäudes* vorgenommen, so wird ein neues *Wärmeversorgungspaket* (vgl. Tabelle 26) mit Fremdschlüssel auf das vorige *Wärmeversorgungspaket* erzeugt und beim *Einzelgebäude* (vgl. Tabelle 18) der Fremdschlüssel auf dieses neue *Wärmeversorgungspaket* gesetzt. Zudem werden die getätigten Investitionen für das *Wärmeversorgungspaket*, *Energieträgerverfügbarkeit* sowie *Verrohrung und Speicher* in der Datenstruktur vorgehalten (vgl. Tabelle 18). Außerdem werden *Wärmeerzeuger*, *Verrohrung und Speicher* sowie *Energieträgerverfügbarkeit* mit den entsprechenden Einbaujahren, der Anzahl, der Leistung und Fremdschlüsseln zu zugehörigen Stammdaten und neuem *Wärmeversorgungspaket* erzeugt. Die Deckungsanteile werden für Hauptwärmeerzeuger und Nebewärmeerzeuger jeweils auf 50% gesetzt.

Tabelle 41: Durch Energieträgerwechsel verursachte Investitionen bzw. Ausgaben beim Wechsel der Anlagentechnik je Wohnfläche und je Gebäude im Jahr 2006 (in Anlehnung an: Stengel u. a. 2012; Datengrundlage: Staatliche Vermögens- und Hochbauverwaltung Baden-Württemberg 2006)

Wohnflächenspezifische und gebäudebezogene Investitionen bei Energieträgerwechseln (netto, Stand 2006)							
Energieträgerwechsel	Art der Investition bzw. Ausgabe	RH/EFH (150 m ² Wohnfläche)		MFH/MFH_NBL (1.000 m ² Wohnfläche)		GMH/GMH_NBL/HH/HH_NBL (5.000 m ² Wohnfläche)	
		[€/m ²]	[€/Gebäude]	[€/m ²]	[€/Gebäude]	[€/m ²]	[€/Gebäude]
Von Heizöl	Demontage des alten Tanks	4,2	628	0,6	628	0,1	628
Zu Heizöl	Heizöltank und Kelleraufstellung	19,0	2.854	4,4	4.388	1,3	6.500
Zu Gas	Erdgasanschluss	10	1.500	1,5	1.500	0,3	1.500
Zu Holzpellets	Sacksilo und Fördereinrichtung (auch bei Wechsel von Holz)	36,0	5.405	2,8	2.810	0,6	2.810
Von Elektrizität	Schornstein	13,3	2.000	3,0	3.000	0,8	4.000

Wird ein neues *Hüllenpaket* oder *Wärmeversorgungspaket* eingebaut, so bleiben die Daten zu den vorhergehenden *Hüllenpaketen* und *Wärmeversorgungspaketen* erhalten. Somit kann für jedes modellierte Gebäude die zeitliche Entwicklung nachvollzogen werden.

5.4.3 Indikatoren für Sanierungsentscheidungsmodelle

Zur Simulation der Sanierungsentscheidung werden in *AWOHM* die entscheidenden Akteure, d. h. die Gebäude- und Wohnungseigentümer, gemäß der Ei-

gentrumsstruktur und weiterer Charakteristika differenziert und jeweils einem von mehreren parametrisierten Sanierungsentscheidungsmodellen zugeordnet. Sie handeln dabei als Nutzenmaximierer, d. h. gemäß einer Nutzenfunktion, die jeder der erreichbaren Sanierungsvarianten (vgl. Abschnitt 5.4.2) einen Nutzen zuordnet. Die Sanierungsvariante mit dem höchsten Nutzen wird gewählt. Die Nutzenwerte ergeben sich aus der ggf. normierten und gewichteten Aggregation von Indikatoren.

Um der mit der Modellierung menschlichen Entscheidungsverhaltens einhergehenden Unsicherheit gerecht zu werden, wird ein flexibler, szenario-basierter Gesamtansatz verfolgt (vgl. Modellanforderungen in Abschnitt 5.1).

Die Entscheidung der Akteure kann entweder aus *Potenzialsicht* oder aus *Eigentümersicht* erfolgen. Die *Potenzialsichtweise* dient dabei der Identifizierung technischer¹⁰² und ökonomischer¹⁰³ Potenziale zur Minderung von Emissionen und Energieverbrauch. Die *Eigentümersichtweise* zielt dahingegen primär auf die Simulation des tatsächlichen Entscheidungsverhaltens und damit die Identifizierung ausschöpfbarer¹⁰⁴ Potenziale ab. Je nach Szenario werden bei der *Eigentümersichtweise* *annahmenbasierte* oder *empirisch begründete* Sanierungsentscheidungsmodelle herangezogen. Die *Potenzialsichtweise*

¹⁰² Das technische Potenzial sei definiert als maximale Emissionsminderung bzw. Primärenergieverbrauchsreduktion bei den in *AWOHM* vorgegebenen technischen Möglichkeiten und unter Beibehaltung der zeitlichen Kopplung von Modernisierungsmaßnahmen an die Sanierungszyklen von Gebäudehülle und Anlagentechnik.

¹⁰³ „Das“ ökonomische Potenzial sei definiert als das Potenzial, das bei Entscheidung gemäß Kapitalwert aus Selbstnutzersicht bei den in *AWOHM* vorgegebenen technischen Möglichkeiten unter Beibehaltung der zeitlichen Kopplung von Modernisierungsmaßnahmen an die Sanierungszyklen von Gebäudehülle und Anlagentechnik resultiert. Es ist daher auch von umweltpolitischen Instrumenten abhängig.

¹⁰⁴ Das ausschöpfbare Potenzial sei definiert als der Teil des ökonomischen Potenzials, der in der Realität genutzt werden kann. Die Ausnutzung des ökonomischen Potenzials wird bspw. durch mangelnde Möglichkeiten zur Finanzierung, Informationsdefizite und Sanierungsunwilligkeit behindert (vgl. Kapitel 4). Das ausschöpfbare Potenzial ist daher neben den technischen und ökonomischen Randbedingungen des Gebäudes auch von umweltpolitischen Instrumenten sowie Charakteristika der Gebäudeeigentümer und -bewohner bzw. dem Entscheiderverhalten abhängig.

ist dagegen rein annahmenbasiert. Für die *annahmenbasierten* Sanierungsentscheidungsmodelle wird die Nutzwertanalyse (vgl. Dreyer 1975) verwendet. Empirisch begründete Sanierungsentscheidungsmodelle werden parametrisiert aus der Literatur übernommen (vgl. Kapitel 3).

In diesem Abschnitt wird das Vorgehen bei der Auswahl der den Sanierungsentscheidungsmodellen zugrundeliegenden Indikatoren erläutert sowie diese selbst formal beschrieben. Auf die Berechnung der Nutzenwerte mittels Sanierungsentscheidungsmodellen wird im nächsten Abschnitt eingegangen.

5.4.3.1 Auswahl der Indikatoren

Die Indikatoren sollen es ermöglichen, die *Potenzial-* und die *Eigentümersichtweise* bei der Sanierungsentscheidung auf Mikroebene abzubilden. Dadurch soll u. a. die Wirkung unterschiedlicher Bündel umweltpolitischer Instrumente auf die Entwicklung des modellierten Gebäude- und Haushaltsbestands flexibel abgebildet werden. Durch die Aggregation der Entscheidungen und ihrer Auswirkungen von der Mikroebene auf den gesamten Gebäude- und Haushaltsbestand können diese Bündel bewertet werden. Eine Randbedingung ist die Berechenbarkeit der Indikatoren bei der aktuellen Datenlage bzw. -struktur.

Eine hierarchische Übersicht über den für die Bewertung energetischer Modernisierungen aus *Potenzial-* und *Eigentümersicht* bei *annahmenbasierten* Sanierungsentscheidungsmodellen ausgewählten Satz von Indikatoren gibt Tabelle 42. Die jeweilige Sichtweise, für die die Indikatoren direkt oder indirekt benötigt werden, ist ebenfalls angegeben. Die hierarchische Struktur der Indikatoren umfasst drei Ebenen, die als *Dimension (Ebene 1)*, *Kriterium (Ebene 2)* und *Attribut (Ebene 3)* bezeichnet werden. Die vier Dimensionen *Wirtschaftlichkeit*, *Umwelt*, *Hemmnisse* und *Sonstiges* umfassen jeweils bis zu fünf Kriterien und diese jeweils bis zu acht Attribute.

Tabelle 42: Hierarchisch angeordneter Satz von Indikatoren für die Bewertung einer energetischen Sanierung und die zugehörigen Sichtweisen bei *annahmenbasierten* Sanierungsentscheidungsmodellen; X: geeignet, (X): indirekt geeignet

Hierarchisch angeordneter Satz von Indikatoren				Benötigt für Sichtweise			
Ebene 1	Ebene 2	Ebene 3	Kürzel	Potenzial-sichtweise	Eigentümersicht-weise		
					Selbst-nutzer	Ver-mieter	
Wirtschaftlichkeit ¹⁰⁵	Kurzfristige Sichtweise	Investition	Ö1	-	X	X	
	Mittelfristige Sichtweise	Amortisationszeit aus Selbstnutzersicht	Ö2a	X	X	(X)	
		Amortisationszeit aus Vermietersicht	Ö2b	X	-	X	
		Energiekosten	Ö3	-	X	(X)	
	Vorausschauende Sichtweise	Interner Zinsfuß aus Selbstnutzersicht	Ö4a	X	X	(X)	
		Interner Zinsfuß aus Vermietersicht	Ö4b	X	-	X	
		Kapitalwert aus Selbstnutzersicht	Ö5a	X	X	(X)	
		Kapitalwert aus Vermietersicht	Ö5b	X	-	X	
		Barwert aus Mietersicht	Ö5c	X	-	(X)	
		Annuität aus Selbstnutzersicht	Ö6a	X	X	(X)	
		Annuität aus Vermietersicht	Ö6b	X	-	X	
	Energiepreisrisiko	Energiekosten/investitionsabh. Kosten	Ö6c	X	-	(X)	
			Ö7	-	X	(X)	
	Leerstandsrisiko	Endenergiebedarf/durchschnittlicher nationaler Endenergiebedarf		Ö8	-	-	X
	Umwelt	Energiebedarf	Endenergiebedarf	U1	X	X	(X)
Anteil erneuerbarer Energien an Endenergie			U2	X	-	-	
Nicht erneuerbarer Primärenergiebedarf			U3				
Primärenergiebedarf			U4				
Klimaschutz		CO ₂ -Emissionen	U5				
		CH ₄ -Emissionen	U6				
Luftreinhaltung		PM-Emissionen	U7				
		NO _x -Emissionen	U8				
		SO ₂ -Emissionen	U9				
		NMVOE-Emissionen	U10				
Sonstiges	Innenraumkomfort	Dämmqualität	S1	-	X	(X)	
		Dämmtiefe	S2	-	X	(X)	
	Unabhängigkeit	Unabhängigkeit	S3	-	X	(X)	
	Soziale Auswirkungen	Verfügbares Einkommen der Bewohner nach Wohnen	S4	X	X	(X)	
	Innovationsgrad der Technologie	Marktanteil	S5	-	X	X	
		Prestige der Technologie	S6	-	X	X	
		Störende Optik	S7	-	X	(X)	
Hemmnisse	Finanzierung	Investition/Verfügbares Einkommen der Bewohner	H1	-	X	X	
		Marktanteil der Technologie	Deutschland	H2	-	X	X
	Bundesland		H3				
	Bundesland – G GK (Gemeindegrößenklasse)		H4				
	Abstand von vorheriger Technik	Verrohrungswechsel	H5				
		Energieträgerwechsel	H6				
	Illegalität	"Illegale" Variante		H7			

¹⁰⁵ Die Indikatoren sollen u. a. abbilden, wie Gebäudeeigentümer die „Wirtschaftlichkeit“ bzw. ökonomische Implikationen in der Realität beurteilen. Daher sind nicht nur (betriebswirtschaftliche) Wirtschaftlichkeitsmaße aufgeführt, sondern bspw. auch die (leicht nachvollziehbare) Amortisationszeit (Risikomaß) sowie die Investition (im Sinne der Anfangsauszahlung bzw. -ausgabe).

Mithilfe der *Potenzialsichtweise* sollen technische und ökonomische Potenziale identifiziert werden. Hierzu müssen zunächst alle Sanierungsvarianten, die zur Ausschöpfung der Potenziale, die im Fokus der umweltpolitischen Instrumente im Bereich Wärme in Wohngebäuden liegen, mithilfe der Indikatoren identifizierbar sein. Die Quantifizierung der Potenziale, die bei Umsetzung dieser potenzialausnutzenden Sanierungsvarianten genutzt würden, ist Teil der Bewertung und Analyse in Kapitel 6. Zu den im Fokus umweltpolitischer Instrumente liegenden (technischen) Potenzialthemenbereichen zählen die Energiebedarfsreduktion, der Klimaschutz und die Luftreinhaltung. Bei der Energiebedarfsreduktion können dabei weiter End- und Primärenergiebedarf sowie gesamte Energie und der nicht erneuerbare Anteil differenziert werden. Im Bereich Klimaschutz können CO₂- und CH₄-Emissionen und im Bereich der Luftreinhaltung PM-, NO_x-, SO₂- und NMVOC-Emissionen unterschieden werden.¹⁰⁶ Können bspw. auf Mikroebene die durch die Raumwärme- und Warmwasserbereitstellung verursachten jährlichen PM-Emissionen für jede erreichbare Sanierungsvariante bestimmt werden, so ist auch diejenige mit den niedrigsten PM-Emissionen bekannt und kann vom Nutzenmaximierer mit PM-Potenzialsichtweise ausgewählt werden. Die jeweiligen Indikatoren müssen demnach in den zu modellierenden Satz von Indikatoren aufgenommen werden, um die technischen¹⁰⁷ Potenziale bestimmen zu können. Um die ökonomischen¹⁰⁸ Potenziale zu bestimmen, sind ökonomische Indikatoren notwendig. Bei der ökonomischen Bewertung müssen insbesondere die Systemgrenzen klar definiert werden. Bspw. kann die Bewertung aus Sicht der Gesellschaft, des Selbstnutzers, des Vermieters oder des Mieters erfolgen (vgl. Difu 2011). Für die Bestimmung der ökonomischen Potenziale werden daher ökonomische

¹⁰⁶ VOC wird hier wegen der Redundanz mit NMVOC und CH₄ nicht betrachtet. Vgl. Fußnote 187 und Abschnitt 8.2 bez. indirekter Emissionen. Diese werden in *AWOHM* nicht berücksichtigt.

¹⁰⁷ Vgl. Fußnote 102.

¹⁰⁸ Vgl. Fußnote 103 bez. „des“ ökonomischen Potenzials, einem Spezialfall (Selbstnutzersicht) der hier diskutierten ökonomischen Potenziale.

Indikatoren herangezogen, die ohnehin als Teil der *Eigentümersichtweise* differenziert nach Selbstnutzern und Mietern berücksichtigt werden. Wenn keine Förderungen gewährt werden, kann durch diese Indikatoren auch die Sichtweise der Gesellschaft exkl. der Berücksichtigung von Umweltschäden näherungsweise abgebildet werden. Die Sichtweise der Gesellschaft (inkl. der Berücksichtigung von Umweltschäden) wird vor allem bei der Bewertung aus Staatssicht (vgl. Kapitel 6) eingenommen. Das ökonomische Potenzial aus gesellschaftlicher Sicht lässt sich in erster Näherung als Kompromiss zwischen den Dimensionen *Wirtschaftlichkeit* und *Umwelt* in Tabelle 42 interpretieren.

Mithilfe der *Eigentümersichtweise* sollen die ausschöpfbaren Potenziale abgeschätzt werden. Da hierfür menschliches Verhalten simuliert werden muss, sind die ausschöpfbaren Potenziale¹⁰⁹ mit großen Unsicherheiten behaftet. Daher wird der Schwerpunkt auf szenariobasierte „Wenn-Dann“-Aussagen und Sensitivitätsanalysen gelegt. Die *Eigentümersichtweise* erfordert bei der Indikatorauswahl die Aufnahme von Kennwerten, die die Sanierungsentscheidung beeinflussen oder bspw. nach Eingriffen des Staates beeinflussen könnten. Derartige Kennwerte hängen auch von der Eigentumssituation ab (vgl. Tabelle 42). Bspw. sind für selbstnutzende Eigentümer und Vermieter unterschiedliche Systemgrenzen relevant. Vermieter müssen teilweise auch die Perspektive der Mieter einnehmen, um die Wirtschaftlichkeit aus ihrer eigenen Sicht bewerten zu können. Bei der Modellierung der Sanierungsentscheidung aus Eigentümersicht werden in dieser Arbeit *annahmenbasierte* und *empirische Ansätze* unterschieden.

Bei den *annahmenbasierten Ansätzen* erfolgte die konkrete Auswahl der Indikatoren dabei als Kompromiss zwischen den in Kapitel 4 identifizierten Sanierungsmotiven und -hemmnissen sowie der Notwendigkeit, dass die Indikatoren bei existierender Datenlage und der gewählten Datenstruktur berechenbar sein müssen. Diese Indikatoren sollen die Definition transparenter *Entschei-*

¹⁰⁹ Vgl. Fußnote 104.

dertypen und -strategien ermöglichen, anhand derer interpretierbare „Wenn-Dann“-Aussagen über das ausschöpfbare Potenzial bei unterschiedlichen Bündeln umweltpolitischer Instrumente gemacht werden können. Zudem ermöglichen Sensitivitätsanalysen in Bezug auf die *Entscheidertypen und -strategien* die Ableitung von Empfehlungen hinsichtlich der Ausgestaltung umweltpolitischer Instrumente.

Die *empirischen Ansätze* stellen für den Fall selbstnutzender Eigentümer eine Alternative zu den auf Annahmen basierenden *Entscheidertypen und -strategien* dar. Bei den empirischen Ansätzen werden Sanierungsentscheidungsmodelle aus der Literatur herangezogen, deren unabhängige Variablen als Indikatoren von *AWOHM* bereitgestellt werden müssen. Vorteil dieser Modelle ist die empirische Fundierung und die Wiederverwendung bereits geschätzter und veröffentlichter Parameter, die teilweise auf umfangreichen Datensätzen basieren. Diese Modelle wurden bereits plausibilisiert und können daher eine geringere Unsicherheit aufweisen. In Kapitel 3 wurde auf konkrete Sanierungsentscheidungsmodelle für die Simulation der Investitionsentscheidung von Selbstnutzern in Deutschland eingegangen. Diese *Logit*-Modelle unterscheiden sich u. a. hinsichtlich der benötigten Eingangsdaten (unabhängige Variablen) und den Anwendungsfällen. Bei einer Integration dieser Modelle in *AWOHM* sollten die benötigten Eingangsdaten modellendogen bereitgestellt werden können und die Anwendungsfälle übereinstimmen. Können bestimmte Eingangsdaten nicht bereitgestellt werden oder weichen die Anwendungsfälle voneinander ab, erhöht sich die Unsicherheit und kann ggf. diejenige des auf *Entscheidertypen und -strategien* basierenden Ansatzes übersteigen. Daher werden die zu integrierenden empirischen Modelle anhand der Eingangsdaten und der Anwendungsfälle ausgewählt. Der Sanierungszeitpunkt in *AWOHM* resultiert aus Sanierungszyklen von Gebäudehülle und Anlagentechnik. Daraus ergeben sich drei Anwendungsfälle: potenzielle Kombination von Anlagentechnikwechsel und Gebäudehüllenmodernisierung; potenzieller Anlagentechnikwechsel; potenzielle Gebäudehüllenmodernisierung.

Im Folgenden werden die empirischen Modelle aus Kapitel 3, die sich auf Deutschland beziehen, hinsichtlich ihrer Eignung für die Integration in *AWOHM* priorisiert. Dabei wird auf den konkreten Anwendungsfall Bezug genommen. Stehen gleichzeitig *Anlagentechnikwechsel* und *Gebäudehüllensanierung* an, können die Modelle von Grösche u. a. (2009) sowie Grösche & Vance (2009) herangezogen werden. Für das erste Modell können 4 von 5 Eingangsvariablen, für das zweite 5 von 6 Eingangsvariablen von *AWOHM* bereitgestellt werden. Die nicht bestimmbar Variablen können pauschal oder durch Zufallsziehung gesetzt werden. Da bei dem Ansatz von Grösche & Vance (2009) die alternativenabhängigen Konstanten jedoch nicht veröffentlicht wurden, kann nur das Modell von Grösche u. a. (2009) angewendet werden (vgl. Tabelle 3). Das Modell von Grösche & Vance (2009) wird daher im Folgenden nicht mehr berücksichtigt.

Falls nur ein *Anlagentechnikwechsel* ansteht, können 4 Modelle zum Einsatz kommen (ohne das Modell von Grösche & Vance (2009)). Bestimmbar sind bei Achtnicht (2011) 12 von 15 (80%), bei Grösche u. a. (2009) 4 von 5 (80%), bei Michelsen & Madlener (2012) 14 von 26 (54%) und bei Henkel (2011) 3 von 7 (43%) Eingangsvariablen. Hinsichtlich der Bestimmbarkeit der Inputdaten sind daher die ersten beiden Modelle vorzuziehen. Der Ansatz von Achtnicht (2011) ist detaillierter, und im Gegensatz zu Grösche u. a. (2009) beeinflussen sozio-demographische Eigenschaften der Eigentümer – Alter und Bildungsgrad – die Entscheidung (vgl. Kapitel 4). Daher bietet sich eine Integration beider Ansätze in *AWOHM* mit etwaiger Gegenüberstellung der Ergebnisse an. Die anderen beiden Ansätze werden verworfen, da ein größerer Anteil der Eingangsvariablen nicht von *AWOHM* bereitgestellt werden kann. Alternativ könnten sämtliche unsicheren Eingangsvariablen konstant gesetzt oder als Zufallsvariablen berücksichtigt werden, wobei dann mit abnehmender Güte der Modelle bzw. einer stärkeren Streuung der Gesamtergebnisse zu rechnen ist.

Steht nur die Sanierung der *Gebäudehülle* an, so können die Modelle von Achtnicht (2011) und Grösche u. a. (2009) mit 6 von 8 (75%) bzw. 4 von 5

(80%) Eingangsvariablen angewendet werden. Es bietet sich wiederum die Integration beider Ansätze in *AWOHM* an.

Insgesamt eignen sich damit insbesondere die Modelle von Grösche u. a. (2009) sowie Achtnicht (2011) – im Folgenden auch Modell A und B – für eine Integration in *AWOHM*. Die Indikatoren, die als Input für die Anwendung der beiden Modelle benötigt werden und daher ebenfalls berechnet werden sollen, sind in Tabelle 43 angegeben. Da jedoch aufgrund von Datenlage und Datenstruktur nicht jede Eingangsvariable auf Mikroebene berechnet werden kann, wird zudem die Berechenbarkeit der Indikatoren angegeben. Für die nicht berechenbaren Indikatoren werden konstante Werte angesetzt.

Tabelle 43: Indikatoren, die als Eingangsvariablen für die Anwendung der Sanierungsentscheidungsmodelle von Grösche u. a. (2009) sowie Achtnicht (2011) bei Selbstnutzern benötigt werden (auf Basis von: Grösche u. a. 2009; Achtnicht 2011)

Modell	Dimension (Ebene 1)	Kriterium (Ebene 2)	Benötigter Indikator bzw. Attribut (Ebene 3)	Kürzel	Berechenbarkeit in <i>AWOHM</i>
Grösche u. a. (2009)	Dimension Modell A	Kriterium Modell A	Investition	G1	Ja
			Primärenergiebedarfseinsparung	G2	Ja
			Verfügbares Einkommen	G3	Ja
			Informationszugriff	G4	Nein
			Energieverbrauch	G5	Ja (bedingt)
			Hilfsindikator	G6	Ja
Achtnicht (2011)	Dimension Modell B	Kriterium Modell B	Investition (abzüglich Zuschuss)	A1	Ja
			Investition (abzüglich Zuschuss) in Ostdeutschland	A2	Ja
			Energieeinsparpotenzial	A3	Ja
			Amortisationszeit	A4	Ja
			CO ₂ -Einsparung und Anlagentechnikwechsel	A5	Ja
			CO ₂ -Einsparung und Hüllensanierung	A6	Ja
			Empfehlung von Energieberater	A7	Nein
			Förderung	A8	Ja
			Garantiejahre	A9	Nein
			Nur Anlagentechnikwechsel	A10	Ja
			Anlagentechnikneubau nach 2000 und Anlagentechnikwechsel	A11	Ja
			Eigentümer jünger als 46 Jahre und Anlagentechnikwechsel	A12	Ja
			Hoher Bildungsabschluss und Anlagentechnikwechsel	A13	Ja
			Hat Pelletkessel und Anlagentechnikwechsel	A14	Ja
			Energiepreisanstiegserwartung und Anlagentechnikwechsel	A15	Nein
			Kein Bedarf an einer Verbesserung der Gebäudehülle und Anlagentechnikwechsel	A16	Ja

5.4.3.2 Formale Beschreibung der Indikatoren auf Attributsebene

Die für die formale Spezifikation der Indikatoren aus Tabelle 42 und Tabelle 43 auf Attributsebene verwendeten Indizes, Mengen, Variablen und

Parameter sind in Tabelle 44 bis Tabelle 49 angegeben. Dabei werden jeweils Quellen oder – in den meisten Fällen – Referenzen auf Abschnitte angegeben, in denen die betreffenden Größen und deren Quellen beschrieben wurden. Tabelle 44 fasst die verwendeten Indizes und Indexmengen, Tabelle 45 zugehörige Indexteilmengen und Tabelle 46 spezielle Indizes zusammen. Tabelle 47 umfasst Parameter mit Index und Tabelle 48 Zwischenergebnisse mit Index. Letztere werden in den folgenden Formeln definiert. Kürzel, Attribute und Quellen der Klasse *sonstige Parameter* (vgl. Abschnitt 5.3.1) sind in Tabelle 49 angegeben. Diese stellen Parameter ohne bzw. ohne veränderbaren Index (an dessen Schreibweise in Großbuchstaben erkennbar) dar.

Tabelle 44: Indizes und Indexmengen für die Indikatorspezifikation auf Attributsebene

Kürzel	Beschreibung	Quelle oder Verweis
$b \in B$	Bewohner (Haushalte)	Vgl. Indizes in Abschnitt 5.3.
$et \in ET$	Energieträger	
$g \in G$	Einzelgebäude	
$gs \in GS$	Energetische Stammdaten	
$h \in H$	Hüllenpakete	
$hf \in HF$	Fenster	
$ho \in HO$	Obere Gebäudeabschlüsse	
$hu \in HU$	Untere Gebäudeabschlüsse	
$hw \in HW$	Außenwände	
$m \in M$	Emissionsarten; $M = \{CO_2, CH_4, PM, NO_x, SO_2, NMVOC\}$	
$pb \in PB$	Bundesländer	Vgl. Indizes in Abschnitt 5.3.
$pg \in PG$	Gemeinden	
$pgk \in PGK$	Gemeindegrößenklasse	Vgl. Gemeindegrößenklasse in Tabelle 37
$pk \in PK$	Kreise	Vgl. Indizes in Abschnitt 5.3.
$v \in V$	Wärmeversorgungspakete	
$ve \in VE$	Energieträgerverfügbarkeiten	
$ves \in VES$	Stammdaten Energieträgerverfügbarkeit	
$vv \in VV$	Verrohrungen/Speicher	
$vvs \in VVS$	Stammdaten Verrohrungen/Speicher	
$vw \in VW$	Wärmeerzeuger	
$vws \in VWS$	Stammdaten Wärmeerzeuger	
$w \in W$	Wohnungen	

Tabelle 45: Indexteilmengen für die Indikatorspezifikation auf Attributsebene

Kürzel	Beschreibung	Quelle oder Verweis
$B_a \subseteq B$	Bewohner eines Gebäudes	Fremdschlüssel
$B_{GER} \subseteq B$	Gebäudeeigentümer	Einteilung gemäß Eigentumsverhältnissen bez. Wohnung in Tabelle 16
$B_{GEM} \subseteq B$	Wohnungseigentümer	
$B_{MIET} \subseteq B$	Mieter	
$B_{pb,pgk} \subseteq B$	Bewohner einer Kombination aus Bundesland und Gemeindegrößenklasse	Fremdschlüssel und Einteilung gemäß Attributen
$B_w \subseteq B$	Bewohner einer Wohnung	Fremdschlüssel
$EET \subseteq ET$	Erneuerbare Energieträger	Holz und andere erneuerbare Energieträger, Solarenergie
$G_{pgk} \subseteq G$	Einzelgebäude einer Gemeindegrößenklasse	Einteilung gemäß Gemeindegrößenklasse in Tabelle 18

5.4 Modellierung der Gebäudebestandsveränderung

Kürzel	Beschreibung	Quelle oder Verweis
$G_{nb} \subseteq G$	Einzelgebäude eines Bundeslands	Fremdschlüssel
$H_g \subseteq H$	Potenzielle Hüllenpakete eines Einzelgebäudes	Abschnitt 5.4.2
$V_g \subseteq V$	Potenzielle Wärmeversorgungspakete eines Einzelgebäudes	
$VES_g \subseteq VES$	Stammdaten Energieträgerverfügbarkeit eines Wärmeversorgungs pakets	Fremdschlüssel
$VVS_v \subseteq VVS$	Stammdaten Verrohrungen/Speicher eines Wärmeversorgungs pakets	
$VW_v \subseteq VW$	Wärmeerzeuger eines Wärmeversorgungs pakets	
$W_g \subseteq W$	Wohnungen eines Einzelgebäudes	
$W_{pb,p,g,k} \subseteq W$	Wohnungen einer Kombination aus Bundesland und Gemeindegrößenklasse	

Tabelle 46: Spezielle Indizes für die Indikatorspezifikation auf Attributsebene

Kürzel	Beschreibung	Quelle oder Verweis
$b_w \in B$	Bewohner einer Wohnung	Fremdschlüssel
gs_g	Energetische Stammdaten eines Einzelgebäudes	
h_g	Hüllenpaket eines Einzelgebäudes vor der Sanierung	
hf_h	Fenster eines Hüllenpakets	
ho_h	Oberer Gebäudeabschluss eines Hüllenpakets	
hu_h	Unterer Gebäudeabschluss eines Hüllenpakets	
hw_h	Außenwand eines Hüllenpakets	
pb_b	Bundesland eines Bewohners	
pb_g	Bundesland eines Einzelgebäudes	
pgk_g	Gemeindegrößenklasse eines Einzelgebäudes	
v_g	Wärmeversorgungs paket eines Einzelgebäudes vor der Sanierung	Fremdschlüssel
ves_{vw}	Stammdaten Energieträgerverfügbarkeit einer Energieträgerverfügbarkeit	
vvs_{sv}	Stammdaten Verrohrungen/Speicher einer Verrohrung/eines Speichers	Fremdschlüssel und Attribut
$vvs_{RAUM,v}$	Stammdaten Raumwärmeverrohrung eines Wärmeversorgungs pakets	
$vvs_{WASSER,v}$	Stammdaten Warmwasserverrohrung eines Wärmeversorgungs pakets	
vws_{vw}	Stammdaten Wärmeerzeuger eines Wärmeerzeugers	Fremdschlüssel

Tabelle 47: Parameter mit Index für die Indikatorspezifikation auf Attributsebene;
*: Energiebedingte Mehrinvestition

Kürzel	Beschreibung	Quelle oder Verweis
η_{vvs}	Jahresnutzungsgrad von Stammdaten Verrohrung/Speicher [kWh/kWh]	Abschnitt 5.3.11
η_{vws}	Jahresnutzungsgrad von Stammdaten Wärmeerzeuger [kWh/kWh]	Abschnitt 5.3.9
A_{gs}	Wohnfläche Stammdaten Gebäude [m ²]	Abschnitt 5.3.5
A_w	Gesamtflächen einer Wohnung [m ²]	Abschnitt 5.3.2
AFN_{gs}	Transparente Bauteilflächen Nord [m ²]	Abschnitt 5.3.5
AFS_{gs}	Transparente Bauteilflächen Süd [m ²]	
$AFWO_{gs}$	Transparente Bauteilflächen West/Ost [m ²]	Abschnitt 5.3.5
AL_h	Alter eines Bewohners (Haushalts) [a]	
AO_{gs}	Bauteilfläche obere Gebäudeabschlüsse [m ²]	
AU_{gs}	Bauteilfläche untere Gebäudeabschlüsse [m ²]	
AW_{gs}	Bauteilfläche Außenwände [m ²]	Abschnitt 5.3.2
BG_b	Bildungsgrad eines Bewohners (Haushalts)	
BJ_g	Baujahr eines Gebäudes	Abschnitt 5.3.4
$DA_{et,vws}$	Anteil eines Energieträgers am Endenergiebedarf von Stammdaten Wärmeerzeuger [kWh/kWh]	Abschnitt 5.3.9
$DA_{RAUM,vw}$	Deckungsanteil eines Wärmeerzeugers am Nutzenergiebedarf für Raumwärme [kWh/kWh]	
$DA_{WASSER,vw}$	Deckungsanteil eines Wärmeerzeugers am Nutzenergiebedarf für Warmwasser [kWh/kWh]	Abschnitt 5.3.10
DI_{ves}	Demontage- und Entsorgungsausgaben für Stammdaten Energieträgerverfügbarkeit [€]	

5 Entwicklung des aktorsbasierten Wohngebäude- und Haushaltsmodells

Kürzel	Beschreibung	Quelle oder Verweis
$EF_{vws,CO_2,exkl. Biomasse}$	Endenergiebezogener Emissionsfaktor von Stammdaten Wärmeerzeuger für CO ₂ exkl. Biomasseemissionen [kg/kWh]	Abschnitt 5.3.9
$EF_{vws,m}$	Endenergiebezogener Emissionsfaktor von Stammdaten Wärmeerzeuger für eine Emissionsart [kg/kWh]	
EK_b	Haushaltsnettoeinkommen eines Bewohners (Haushalts) [€/Monat]	Abschnitt 5.3.2
$F_{ABS,v,h}$	Barwert der steuerlichen Absetzbarkeit bei selbstnutzenden Eigentümern [€]	Abschnitt 5.6.3
$F_{FF,v,h}$	Barwert der Förderung über finanzielle Förderprogramme bei Wechsel zu einem Wärmeversorgungspaket und Hüllenpaket [€]	
$F_{v,h}$	Barwert der Förderung bei Wechsel zu einem Wärmeversorgungspaket und Hüllenpaket [€]	
G_{hf}	Gesamtenergiedurchlassgrad der Verglasung eines Fensters [-]	Abschnitt 5.3.7
GH_b	Geschlecht eines Bewohners (Haushalts)	Abschnitt 5.3.2
HG_b	Haushaltsgröße eines Bewohners (Haushalts) [Personen]	Abschnitt 5.3.7
I_{hf}	Investition* für ein Fenster [€/m ²]	
I_{ho}	Investition* für einen oberen Gebäudeabschluss [€/m ²]	
I_{hu}	Investition* für einen unteren Gebäudeabschluss [€/m ²]	
I_{hw}	Investition* für eine Außenwand [€/m ²]	
I_{vws}	Investition für Stammdaten Energieträgerverfügbarkeit [€]	
I_{vws}	Investition für Stammdaten Verrohrung/Speicher [€]	Abschnitt 5.3.11
I_{vws}	Investition für Stammdaten Wärmeerzeuger [€]	Abschnitt 5.3.9
MA_{vws}	Modernisierungsanteil für Stammdaten Energieträgerverfügbarkeit [€/€]	Abschnitt 5.3.10
MA_{vws}	Modernisierungsanteil für Investition für Stammdaten Verrohrung/Speicher [€/€]	Abschnitt 5.3.11
MA_{vws}	Modernisierungsanteil der Investition für Stammdaten Wärmeerzeuger [€/€]	Abschnitt 5.3.9
Ost_{pb}	Neues Bundesland [1 (ja), 0 (nein)]	Abschnitt 5.3.12
P_{et}	Endenergiebezogener Preis eines Energieträgers [€/kWh]	Abschnitt 5.3.9
PEF_{et}	Primärenergiefaktor (einschließlich erneuerbarem Anteil) eines Energieträgers [kWh/kWh]	
$PEF_{NE,et}$	Primärenergiefaktor (nicht erneuerbarer Anteil) eines Energieträgers [kWh/kWh]	
PK_{vws}	Stammdaten Wärmeerzeuger von Pelletkessel [1 (ja), 0 (nein)]	
PR_{et}	Prestige eines Energieträgers [-]	
QS_{hf}	Qualitätsstufe eines Fensters [-]	
QS_{ho}	Qualitätsstufe eines oberen Gebäudeabschlusses [-]	Abschnitt 5.3.5
QS_{hu}	Qualitätsstufe eines unteren Gebäudeabschlusses [-]	
QS_{hw}	Qualitätsstufe einer Außenwand [-]	
RT_{gs}	Reduktionsfaktor für transparente Bauteilflächen [-]	
U_{hf}	Wärmedurchgangskoeffizient eines Fensters [W/(m ² K)]	Abschnitt 5.3.7
U_{ho}	Wärmedurchgangskoeffizient eines oberen Gebäudeabschlusses [W/(m ² K)]	Abschnitt 5.3.9
U_{hu}	Wärmedurchgangskoeffizient eines unteren Gebäudeabschlusses [W/(m ² K)]	
U_{hw}	Wärmedurchgangskoeffizient einer Außenwand [W/(m ² K)]	
UN_{et}	Unabhängigkeit eines Energieträgers [-]	Abschnitt 5.3.9
V_{gs}	Beheiztes Gebäudevolumen nach EnEV [m ³]	Abschnitt 5.3.5

Tabelle 48: Zwischenergebnisse mit Index für die Indikatorspezifikation auf Attributs-ebene

Kürzel	Beschreibung
$\#_{hf}$	Anteil eines Fensters an allen Fenstern [-]
$\#_{hf,pb}$	Anteil eines Fensters an allen Fenstern eines Bundeslands [-]
$\#_{hf,pb,pgk}$	Anteil eines Fensters an allen Fenstern einer Gemeindegrößenklasse eines Bundeslands [-]
$\#_{ho}$	Anteil eines oberen Gebäudeabschlusses an allen oberen Gebäudeabschlüssen [-]
$\#_{ho,pb}$	Anteil eines oberen Gebäudeabschlusses an allen oberen Gebäudeabschlüssen eines Bundeslands [-]
$\#_{ho,pb,pgk}$	Anteil eines oberen Gebäudeabschlusses an allen oberen Gebäudeabschlüssen einer Gemeindegrößenklasse eines Bundeslands [-]
$\#_{hu}$	Anteil eines unteren Gebäudeabschlusses an allen unteren Gebäudeabschlüssen [-]
$\#_{hu,pb}$	Anteil eines unteren Gebäudeabschlusses an allen unteren Gebäudeabschlüssen eines Bundeslands [-]
$\#_{hu,pb,pgk}$	Anteil eines unteren Gebäudeabschlusses an allen unteren Gebäudeabschlüssen einer Gemeindegrößen-

5.4 Modellierung der Gebäudebestandsveränderung

Kürzel	Beschreibung
	Benklasse eines Bundeslands [-]
# _{nw}	Anteil einer Außenwand an allen Außenwänden [-]
# _{nw,pb}	Anteil einer Außenwand an allen Außenwänden eines Bundeslands [-]
# _{nw,pb,pgk}	Anteil einer Außenwand an allen Außenwänden einer Gemeindegrößenklasse eines Bundeslands [-]
# _{vws}	Anteil eines Wärmeerzeugers an allen Wärmeerzeugern [-]
# _{vws,pb}	Anteil eines Wärmeerzeugers an allen Wärmeerzeugern eines Bundeslands [-]
# _{vws,pb,pgk}	Anteil eines Wärmeerzeugers an allen Wärmeerzeugern einer Gemeindegrößenklasse eines Bundeslands [-]
I _h	Investition für ein Hüllenpaket [€]
IV _{E_{v,h}}	Energieträgerwechselinvestition bei Wechsel zu einem Wärmeversorgungspaket und Hüllenpaket [€]
IV _{V_{v,h}}	Verrohrungs-/Speicherinvestitionen bei Wechsel zu einem Wärmeversorgungspaket und Hüllenpaket [€]
IV _{W_{v,h}}	Wärmeerzeugerinvestitionen bei Wechsel zu einem Wärmeversorgungspaket und Hüllenpaket [€]
Q _{i,h}	Innere Wärmequellen eines Hüllenpakets [kWh/a]
Q _{L,h}	Lüftungswärmeverluste eines Hüllenpakets [kWh/a]
Q _{RAUM,h}	Raumwärmenutzenergiebedarf eines Hüllenpakets [kWh/a]
Q _{s,h}	Solare Einstrahlung eines Hüllenpakets h [kWh/a]
Q _{tr,h}	Transmissionswärmeverluste eines Hüllenpakets [kWh/a]
Q _{WASSER,g}	Warmwassernutzenergiebedarf eines Gebäudes [kWh/a]
T	Planungshorizont [a]
U _{L_{v,h}}	Umlagefähige Investition bei Wechsel zu einem Wärmeversorgungspaket und Hüllenpaket [€]

Tabelle 49: Kürzel, Attribute und Quellen der Klasse *sonstige Parameter*

Kürzel	Attribut	Quelle oder Verweis
η_F	Nutzbarer Anteil der freien Wärme [-]	Loga & Imkeller-B. (1997)
θ	Gradstunden [kWh/a]	Loga (2012)
EAE	Energiepreisanstiegserwartung [1 (steigend), 0 (konstant)]	Annahmen des Autors
ED	Anzahl der Energieberater pro Wohngebäude mit 1-2 Wohneinheiten [-]	
J _{RED}	Reduktionsfaktor Nacht- und Wochenendaabsenkung [-]	Loga & Imkeller-B. (1997)
G	Garantiejahre [a]	Annahmen des Autors
GN	Globalstrahlung während der Heiztage auf eine Nordfläche [kWh/(m ² a)]	Loga (2012)
GS	Globalstrahlung während der Heiztage auf eine Südfläche [kWh/(m ² a)]	
GWO	Globalstrahlung während der Heiztage auf eine West-/Ostfläche [kWh/(m ² a)]	
i	Kalkulationszinssatz [1/a]	Annahmen des Autors
n	Energetisch wirksamer Luftwechsel [1/h]	Loga & Imkeller-B. (1997)
\bar{Q}	Durchschnittlicher wohnflächenspezifischer nationaler Endenergiebedarf für Raumwärme und Warmwasser [kWh/(m ² a)]	Modellergebnis (vgl. Abschnitt 6.1.3)
Q _{INNEN}	Wärmeabgabeleistung innerer Wärmequellen [W/m ²]	Loga & Imkeller-Benjes (1997)
Q _{WASSER,p}	Pro-Kopf-Warmwassernutzenergiebedarf [kWh/(a Person)]	
RB	Reduktionsfaktor für Bauteile [-]	
t _h	Länge der Heizzeit [d/a]	Loga (2012)
TH	Lebensdauer von Hüllenpaketen (Oberer Gebäudeabschluss, Fenster, Außenwände, unterer Gebäudeabschluss) [a]	BMVBW (2001)
tp	Jährliche Energieteuerungsrate [1/a]	Annahmen des Autors
TVE	Planungshorizont für Energieträgerwechselinvestitionen [a]	
TVV	Planungshorizont für Verrohrungs- und Speicherinvestitionen [a]	
TVW	Lebensdauer von Wärmeerzeugern [a]	VDI 2067 (2000)
UM	Auf die Mieter umgelegter Anteil der Modernisierung [-]	Annahmen des Autors

Basis für die Berechnung der meisten Indikatoren aus Tabelle 42 und Tabelle 43 ist der Nutzenergiebedarf der Gebäude für Raumwärme und Warmwasser. Dieser wird gemäß einem von Loga & Imkeller-Benjes (1997) spezifizierten Verfahren berechnet. Der Warmwassernutzenergiebedarf eines

Einzelgebäudes g basiert auf der Summe der Haushaltsgrößen (HG_b) im Gebäude und dem Pro-Kopf-Warmwassernutzenergiebedarf ($Q_{WASSER,P}$).

$$Q_{WASSER,g} = Q_{WASSER,P} * \sum_{b \in B_g} HG_b \quad (5.1)$$

Der Raumwärmenutzenergiebedarf eines Gebäudes mit einem *Hüllenpaket* h setzt sich nach Loga & Imkeller-Benjes (1997) aus Transmissions- und Lüftungswärmeverlusten abzüglich interner und solarer Gewinne zusammen. Letztere ergeben sich als nutzbarer Anteil der freien Wärme, d. h. den inneren Wärmequellen und der solaren Einstrahlung.

$$Q_{RAUM,h} = Q_{T,h} + Q_{L,h} - \eta_F * (Q_{I,h} + Q_{S,h}) \quad (5.2)$$

Die verwendete Methode für die Abschätzung der Transmissionswärmeverluste basiert auf den Wohnflächen der Wohnungen des Einzelgebäudes, der Wohnfläche der energetischen Stammdaten, d. h. des Typgebäudes, sowie den Bauteilflächen, Wärmedurchgangskoeffizienten, Reduktionsfaktoren für Bauteile und die eingeschränkte Nutzung (z. B. für unbeheizte Räume) sowie Gradtagen (vgl. Loga & Imkeller-Benjes 1997).

$$Q_{T,h} = \frac{\sum_{w \in W_g} A_w}{A_{gsg}} \left(AO_{gsg} * U_{noh} + AW_{gsg} * U_{hw_h} + AU_{gsg} * U_{hu_h} + \right. \\ \left. (AFS_{gsg} + AFWO_{gsg} + AFN_{gsg}) * U_{fh} \right) * f_{RED} * \theta \quad (5.3)$$

Die Abschätzungsmethode für Lüftungswärmeverluste basiert zudem auf dem Luftvolumen des Gebäudes und dem energetisch wirksamen Luftwechsel (vgl. Loga & Imkeller-Benjes 1997).

$$Q_{L,h} = \frac{\sum_{w \in W_g} A_w}{A_{gsg}} * 0.34 * n * V_{gsg} * f_{RED} * \theta \quad (5.4)$$

Die inneren Wärmequellen hängen von der Länge der Heizzeit, der (wohnflächenspezifischen) Wärmeabgabeleistung innerer Wärmequellen (Abwärme von Personen, Geräten und Warmwasser abzüglich Energie zum Aufheizen und Verdunsten von Wasser) und den Wohnflächen der Wohnungen ab (vgl. Loga & Imkeller-Benjes 1997).

$$Q_{I,h} = 0.024 * Q_{INNEN} * t_H * \sum_{w \in W_g} A_w \quad (5.5)$$

Die solare Einstrahlung wird anhand von Flächen, Gesamtenergiedurchlassgraden und Reduktionsfaktoren der Fenster sowie der Globalstrahlung, jeweils differenziert nach deren Ausrichtung, geschätzt (vgl. Loga & Imkeller-Benjes 1997).

$$Q_{S,h} = \frac{\sum_{w \in W_g} A_w}{A_{gs,g}} \left(GS * AFS_{gs,g} + GWO * AFWO_{gs,g} + GN * AFN_{gs,g} \right) * Gh_{fh} * RT_{gs,g} \quad (5.6)$$

Gradstunden, Heizzeit und Globalstrahlung wurden für vorgegebene mittlere Raumtemperaturen, Heizgrenztemperaturen und Außentemperaturen von Loga (2012) für das „Standardklima Deutschland“ übernommen. Für die Verteilung von Emissionen auf Monate wurden anhand von Gradstunden entsprechende Emissionsanteile differenziert nach Monaten abgeschätzt.

Indikatoren für annahmenbasierte Sanierungsentscheidungsmodelle

Im Folgenden werden die Indikatoren aus Tabelle 42 auf Attributsebene für ein *Einzelgebäude g* formal beschrieben. Die Kenntnis des Index *g* wird im Folgenden vorausgesetzt. In Abschnitt 5.4.4 wird die Aggregation der Indikatoren zu Nutzenwerten über die Bündelung zu Kriterien und Dimensionen erläutert.

(Ü1) Endenergiebedarf [kWh/(m² a)]

$$\begin{aligned} \ddot{U}_1(h, v) &= \sum_{et \in ET} \ddot{U}_{1,et}(h, v) \\ \ddot{U}_{1,et}(h, v) &= \\ \text{mit } \frac{\sum_{vw \in VW_v} \frac{DA_{et,vwsvw}}{\eta_{vsvw}} \left[\frac{D_{RAUM,vw} * Q_{RAUM,h}}{\eta_{vsvsRAUM,v}} + \frac{D_{WASSER,vw} * Q_{WASSER,g}}{\eta_{vsvsWASSER,v}} \right]}{\sum_{w \in W_g} A_w} \end{aligned} \quad (5.7)$$

(Ü2) Anteil erneuerbarer Energien an Endenergie [kWh/kWh]

$$\ddot{U}_2(h, v) = \frac{\sum_{vw \in VW_v} \sum_{et \in EET} \frac{DA_{et,vwsvw}}{\eta_{vsvw}} \left[\frac{D_{RAUM,vw} * Q_{RAUM,h}}{\eta_{vsvsRAUM,v}} + \frac{D_{WASSER,vw} * Q_{WASSER,g}}{\eta_{vsvsWASSER,v}} \right]}{\ddot{U}_1(h, w) * \sum_{w \in W_g} A_w} \quad (5.8)$$

(Ü3) Nicht erneuerbarer Primärenergiebedarf [kWh/(m² a)]

$$\ddot{U}_3(h, v) = \frac{\sum_{vw \in VW_v} \sum_{et \in ET} \frac{PEF_{NE,et} \cdot DA_{et,vwsvw}}{\eta_{vvsvw}} \left[\frac{DARAUM,vw \cdot Q_{RAUM,h}}{\eta_{vvsRAUM,v}} + \frac{DAWASSER,vw \cdot Q_{WASSER,g}}{\eta_{vvsWASSER,v}} \right]}{\sum_{w \in W_g} A_w} \quad (5.9)$$

(Ü4) Primärenergiebedarf [kWh/(m² a)]

$$\ddot{U}_4(h, v) = \frac{\sum_{vw \in VW_v} \sum_{et \in ET} \frac{PEF_{et} \cdot DA_{et,vwsvw}}{\eta_{vvsvw}} \left[\frac{DARAUM,vw \cdot Q_{RAUM,h}}{\eta_{vvsRAUM,v}} + \frac{DAWASSER,vw \cdot Q_{WASSER,g}}{\eta_{vvsWASSER,v}} \right]}{\sum_{w \in W_g} A_w} \quad (5.10)$$

(Ü5-Ü10) CO₂-, CH₄-, PM-, NO_x-, SO₂- und NMVOC-Emissionen [kg/(m² a)]

Anmerkung: Vgl. Fußnote 187 auf S. 372 und Abschnitt 8.2 bez. indirekter Emissionen. Diese werden in *AWOHHM* nicht berücksichtigt.

$$\ddot{U}_y(h, v) = \frac{\sum_{vw \in VW_v} \sum_{et \in ET} \frac{EF_{vvsvw,m}}{\eta_{vvsvw}} \left[\frac{DARAUM,vw \cdot Q_{RAUM,h}}{\eta_{vvsRAUM,v}} + \frac{DAWASSER,vw \cdot Q_{WASSER,g}}{\eta_{vvsWASSER,v}} \right]}{\sum_{w \in W_g} A_w}, \quad (5.11)$$

$m \in M = \{CO_2, CH_4, PM, NO_x, SO_2, NMVOC\}; y \in \{5, \dots, 10\}$

(Ö1) Investition [€]

Anmerkung: Die Investitionen beinhalten die energiebedingten Mehrinvestitionen in Bezug auf die Gebäudehülle sowie die Investition in das Wärmeversorgungspaket (vgl. Anmerkung bei Ö2a).

$$\ddot{O}_1(h, v) = I_h + IVW_{v,h} + IVE_{v,h} + IVV_{v,h} - F_{v,h} \quad (5.12)$$

mit

$$I_h = \frac{\sum_{w \in W_g} A_w}{A_{gs_g}} * [\bar{I}_{ho_h} * AO_{gs_g} * (1 - |\{ho_h\} \cap \{ho_{n_g}\}|) + \bar{I}_{hf_h} * (AFS_{gs_g} + AFWO_{gs_g} + AFN_{gs_g}) * (1 - |\{hf_h\} \cap \{hf_{n_g}\}|) + \bar{I}_{hw_h} * AW_{gs_g} * (1 - |\{hw_h\} \cap \{hw_{n_g}\}|) + \bar{I}_{hu_h} * AU_{gs_g} * (1 - |\{hu_h\} \cap \{hu_{n_g}\}|)]$$

$$IVW_{v,h} = \sum_{vw \in VW_v} I_{vwsvw} * (1 - |\{v\} \cap \{v_g\}|)$$

$$IVE_{v,h} = \sum_{ves \in VES_v \setminus VES_{v_g}} I_{ves} + \sum_{ves \in VES_{v_g} \setminus VES_v} DI_{ves}$$

$$IVV_{v,h} = \sum_{vvs \in VVS_v \setminus VVS_{v_g}} I_{vvs}$$

(Ö2a) Amortisationszeit aus Selbstnutzersicht [a]

Anmerkung: Verglichen wird jeweils die Modernisierungsalternative mit einer Unterlassungsalternative, die in dieser Arbeit als nicht-energetische Sanierung der Gebäudehülle und ggf. durch etwaige Reparaturen ermöglichte Weiternutzung des Wärmeversorgungs pakets über die angesetzte Lebensdauer hinaus definiert wird. Wartung, Inspektion und Instandsetzung werden nicht berücksichtigt, da angenommen wird, dass sich diese zwischen den Alternativen (und existierenden Anlagen) nach Großklos u. a. (2001) in der Regel nicht oder nur geringfügig unterscheiden und somit nicht entscheidungsrelevant sind. Bei Wärmeversorgungs paketen entsprechen die Gesamtinvestitionen unter dieser Annahme Mehrinvestitionen. Würde statt der Weiternutzung bspw. der Einbau eines Brennwertkessels als Bezugswärmeversorgungs paket angesetzt, so wäre die Amortisationszeit von Niedertemperaturkesseln nicht definiert, diejenige von Brennwertkesseln 0 und diejenige von Brennwertkesseln mit solarthermischer Unterstützung positiv. Daher wird in dieser Arbeit die beschriebene Unterlassungsalternative als Bezug herangezogen.

$$\ddot{O}_{2a}(h, v) = \frac{\ddot{O}_1(h, v)}{\sum_{w \in W_g} A_w * (\ddot{O}_3(h, v_g) - \ddot{O}_3(h, v))} \quad (5.13)$$

(Ö2b) Amortisationszeit aus Vermietersicht [a]

$$\ddot{O}_{2b}(h, v) = \frac{\ddot{O}_1(h, v)}{UM * UI_{v,h}} \quad (5.14)$$

mit $UI_{v,h} = I_h + \sum_{vw \in VW_v} MA_{vws_{vw}} I_{vws_{vw}} * (1 - |\{v\} \cap \{v_g\}|) +$
 $\sum_{ves \in VES_v \setminus VES_{v_g}} MA_{ves} * I_{ves} + \sum_{vvs \in VVS_v \setminus VVS_{v_g}} MA_{vvs} * I_{vvs} - F_{v,h}$

(Ö3) Energiekosten [€/ (m² a)]

Anmerkung: Die Startwerte der Energieträgerpreise P_{et} sind zeitabhängig und steigen jährlich gemäß der Energieteuerungsrate tp . Dies ist hier nicht dargestellt, um die Lesbarkeit zu verbessern.

$$\ddot{O}_3(h, v) = \frac{\sum_{vw \in VW_v} \sum_{et \in ET} \frac{Pet + DA_{et, vw} s_{vw}}{\eta_{vw} s_{vw}} \left[\frac{DARAUM_{vw} * QRAUM_h}{\eta_{vw} s_{RAUM_v}} + \frac{DAWASSER_{vw} * QWASSER_g}{\eta_{vw} s_{WASSER_v}} \right]}{\sum_{w \in W_g} A_w} \quad (5.15)$$

(Ö4a) Interner Zinsfuß aus Selbstnutzersicht [-]

$$\ddot{O}_{4a}(h, v) = \min \{ i > 0 \mid \ddot{O}_{5a}(h, v) = 0 \} \quad (5.16)$$

(Ö4b) Interner Zinsfuß aus Vermietersicht [-]

$$\ddot{O}_{4b}(h, v) = \min \{ i > 0 \mid \ddot{O}_{5b}(h, v) = 0 \} \quad (5.17)$$

(Ö5a) Kapitalwert aus Selbstnutzersicht [€]

$$\begin{aligned} \ddot{O}_{5a}(h, v) = & -\ddot{O}_1(h, v) + \\ & \sum_{t=1}^T \frac{\left[\sum_{w \in W_g} A_w * (\ddot{O}_3(h_g, v_g) - \ddot{O}_3(h, v)) * (1+tp)^t \right]}{(1+i)^t} \\ & + \frac{I_h * (TH-T)}{TH * (1+i)^T} + \frac{IVW_{v,h} * (TVW-T)}{TVW * (1+i)^T} + \frac{IVE_{v,h} * (TVE-T)}{TVE * (1+i)^T} + \frac{IVV_{v,h} * (TVV-T)}{TVV * (1+i)^T} \end{aligned} \quad (5.18)$$

mit $T = \min (TH, TVW, TVE, TVV)$

(Ö5b) Kapitalwert aus Vermietersicht [€]

$$\begin{aligned} \ddot{O}_{5b}(h, v) = & -\ddot{O}_1(h, v) + \sum_{t=1}^T \frac{UM * UI_{v,h}}{(1+i)^t} \\ & + \frac{I_h * (TH-T)}{TH * (1+i)^T} + \frac{IVW_{v,h} * (TVW-T)}{TVW * (1+i)^T} + \frac{IVE_{v,h} * (TVE-T)}{TVE * (1+i)^T} + \frac{IVV_{v,h} * (TVV-T)}{TVV * (1+i)^T} \end{aligned} \quad (5.19)$$

mit $T = \min (TH, TVW, TVE, TVV)$

(Ö5c) Barwert aus Mietersicht [€]

$$\ddot{O}_{5c}(h, v) = \sum_{t=1}^T \frac{\sum_{w \in W_g} A_w * (\ddot{O}_3(h_g, v_g) - \ddot{O}_3(h, v)) * (1+tp)^t - UM * UI_{v,h}}{(1+i)^t} \quad (5.20)$$

mit $T = \min (TH, TVW, TVE, TVV)$

(Ö6a) Annuität aus Selbstnutzersicht [€/a]

$$\ddot{O}_{6a}(h, v) = \frac{(1+i)^T * i}{(1+i)^T - 1} * \ddot{O}_{5a}(h, v) \quad (5.21)$$

mit $T = \min (TH, TVW, TVE, TVV)$

(Ö6b) Annuität aus Vermietersicht [€/a]

$$\ddot{O}_{6b}(h, v) = \frac{(1+i)^T * i}{(1+i)^T - 1} * \ddot{O}_{5b}(h, v) \quad (5.22)$$

mit $T = \min(TH, TVW, TVE, TVV)$

(Ö6c) Annuität aus Mietersicht [€/a]

$$\ddot{O}_{6c}(h, v) = \frac{(1+i)^T * i}{(1+i)^T - 1} * \ddot{O}_{5c}(h, v) \quad (5.23)$$

mit $T = \min(TH, TVW, TVE, TVV)$

(Ö7) Energiekosten/investitionsabhängige Kosten [€/€]

$$\ddot{O}_7(h, v) = \frac{\sum_{t=1}^T \frac{[\ddot{O}_3(h, v) * \sum_{w \in W_g} A_w * (1+tp)^t]}{(1+i)^t}}{\ddot{O}_{5d}(h, v) - \sum_{t=1}^T \frac{[\ddot{O}_3(h_g, v_g) - \ddot{O}_3(h, v)] * \sum_{w \in W_g} A_w * (1+tp)^t}{(1+i)^t}} \quad (5.24)$$

mit $T = \min(TH, TVW, TVE, TVV)$

(Ö8) Endenergiebedarf/durchschnittlicher nationaler Endenergiebedarf

[kWh/kWh]

$$\ddot{O}_8(h, v) = \frac{\ddot{U}_1(h, v)}{\bar{Q}} \quad (5.25)$$

(S1) Dämmqualität [-]

$$S_1(h, v) = \frac{(1 - |\{ho_h\} \cap \{ho_{hg}\}|) * (QS_{ho_h} - 7) + (1 - |\{hw_h\} \cap \{hw_{hg}\}|) * (QS_{hw_h} - 7)}{4 * \max\{4 - |\{ho_h\} \cap \{ho_{hg}\}| - |\{hw_h\} \cap \{hw_{hg}\}| - |\{hf_h\} \cap \{hf_{hg}\}| - |\{hu_h\} \cap \{hu_{hg}\}|, 1\}} + \frac{(1 - |\{hf_h\} \cap \{hf_{hg}\}|) * (QS_{hf_h} - 7) + (1 - |\{hu_h\} \cap \{hu_{hg}\}|) * (QS_{hu_h} - 7)}{4 * \max\{4 - |\{ho_h\} \cap \{ho_{hg}\}| - |\{hw_h\} \cap \{hw_{hg}\}| - |\{hf_h\} \cap \{hf_{hg}\}| - |\{hu_h\} \cap \{hu_{hg}\}|, 1\}} \quad (5.26)$$

(S2) Dämmtiefe [-]

$$S_2(h, v) = \frac{4 - |\{ho_h\} \cap \{ho_{hg}\}| - |\{hw_h\} \cap \{hw_{hg}\}| - |\{hf_h\} \cap \{hf_{hg}\}| - |\{hu_h\} \cap \{hu_{hg}\}|}{4} \quad (5.27)$$

(S3) Unabhängigkeit [-]

$$S_3(h, v) = \frac{\sum_{vw \in VW_v} \sum_{et \in ET} \frac{UN_{et} * DA_{et, vws_{vw}}}{\eta_{vws_{vw}}} \left[\frac{DARAUM_{vw} * QRAUM_h}{\eta_{vvs_{RAUM, v}}} + \frac{DAWASSER_{vw} * QWASSER_g}{\eta_{vvs_{WASSER, v}}} \right]}{\sum_{vw \in VW_v} \sum_{et \in ET} \frac{3 * DA_{et, vws_{vw}}}{\eta_{vws_{vw}}} \left[\frac{DARAUM_{vw} * QRAUM_h}{\eta_{vvs_{RAUM, v}}} + \frac{DAWASSER_{vw} * QWASSER_g}{\eta_{vvs_{WASSER, v}}} \right]} \quad (5.28)$$

(S4) Verfügbares Einkommen der Bewohner nach Wohnen [€/a]

Anmerkung: Für diesen Indikator wird angenommen, dass es sich bei den Bewohnern um (fiktive) selbstnutzende Eigentümer handelt.

$$S_4(h, v) = 12 * \sum_{b \in B_g} EK_b - \ddot{O}_{6a}(h, v) \quad (5.29)$$

(S5) Marktanteil als Innovationsgrad der Technologie [-]

$$S_5(h, v) = H_2(h, v) \quad (5.30)$$

(S6) Prestige der Technologie [-]

$$S_6(h, v) = \frac{\sum_{vw \in VW_v} \sum_{et \in ET} \frac{PR_{et} * DA_{et, vws_{vw}}}{\eta_{vws_{vw}}} \left[\frac{DARAUM_{vw} * QRAUM_h}{\eta_{vvs_{RAUM, v}}} + \frac{DAWASSER_{vw} * QWASSER_g}{\eta_{vvs_{WASSER, v}}} \right]}{\sum_{vw \in VW_v} \sum_{et \in ET} \frac{3 * DA_{et, vws_{vw}}}{\eta_{vws_{vw}}} \left[\frac{DARAUM_{vw} * QRAUM_h}{\eta_{vvs_{RAUM, v}}} + \frac{DAWASSER_{vw} * QWASSER_g}{\eta_{vvs_{WASSER, v}}} \right]} \quad (5.31)$$

(S7) Störende Optik [-]

$$S_7(h, v) = U_{hw_h} \quad (5.32)$$

(H1) Investition/Verfügbares Einkommen der Bewohner [€/(€/Monat)]

$$H_1(h, v) = \begin{cases} \frac{\ddot{O}_1(h, v)}{\sum_{b \in B_{GEB} \cap B_g} EK_b}, & \text{wenn } |B_{GEB} \cap B_g| \geq 1 \\ \frac{\ddot{O}_1(h, v)}{\sum_{b \in B_g} EK_b}, & \text{wenn } |B_{GEB} \cap B_g| = 0 \end{cases} \quad (5.33)$$

(H2) Marktanteil der Technologie in Deutschland [-]

$$H_2(h, v) = \frac{\#ho_h + \#hw_h + \#hf_h + \#hu_h + \sum_{vw \in VW_v} \#vws_{vw}}{4 + |VW_v|} \quad (5.34)$$

mit

$$\begin{aligned} \#ho &= \sum_{g \in G} |\{ho\} \cap \{ho_{h_g}\}| / |G| \\ \#hw &= \sum_{g \in G} |\{hw\} \cap \{hw_{h_g}\}| / |G| \\ \#hf &= \sum_{g \in G} |\{hf\} \cap \{hf_{h_g}\}| / |G| \\ \#hu &= \sum_{g \in G} |\{hu\} \cap \{hu_{h_g}\}| / |G| \\ \#vws &= \sum_{g \in G} \sum_{vw \in VW_{v_g}} |\{vws\} \cap \{vws_{vw}\}| / \sum_{g \in G} |VW_{v_g}| \end{aligned}$$

(H3) Marktanteil der Technologie im Bundesland [-]

$$H_3(h, v) = \frac{\#ho_{h,pb_g} + \#hw_{h,pb_g} + \#hf_{h,pb_g} + \#hu_{h,pb_g} + \sum_{vw \in VW_v} \#vws_{vw,pb_g}}{4 + |VW_v|} \quad (5.35)$$

mit

$$\begin{aligned} \#ho_{,pb} &= \sum_{g \in G_{pb}} |\{ho\} \cap \{ho_{h_g}\}| / |G_{pb}| \\ \#hw_{,pb} &= \sum_{g \in G_{pb}} |\{hw\} \cap \{hw_{h_g}\}| / |G_{pb}| \\ \#hf_{,pb} &= \sum_{g \in G_{pb}} |\{hf\} \cap \{hf_{h_g}\}| / |G_{pb}| \\ \#hu_{,pb} &= \sum_{g \in G_{pb}} |\{hu\} \cap \{hu_{h_g}\}| / |G_{pb}| \\ \#vws_{,pb} &= \sum_{g \in G_{pb}} \sum_{vw \in VW_{v_g}} |\{vws\} \cap \{vws_{vw}\}| / \sum_{g \in G_{pb}} |VW_{v_g}| \end{aligned}$$

(H4) Marktanteil der Technologie in Bundesland und Gemeindegrößenklasse [-]

$$H_4(h, v) = \frac{\#ho_{h,pb_g,pbk_g} + \#hw_{h,pb_g,pbk_g} + \#hf_{h,pb_g,pbk_g} + \#hu_{h,pb_g,pbk_g} + \sum_{vw \in VW_v} \#vws_{vw,pb_g,pbk_g}}{4 + |VW_v|} \quad (5.36)$$

mit

$$\begin{aligned} \#ho_{,pb,pbk} &= \sum_{g \in G_{pb} \cap G_{pbk}} |\{ho\} \cap \{ho_{h_g}\}| / |G_{pb} \cap G_{pbk}| \\ \#hw_{,pb,pbk} &= \sum_{g \in G_{pb} \cap G_{pbk}} |\{hw\} \cap \{hw_{h_g}\}| / |G_{pb} \cap G_{pbk}| \\ \#hf_{,pb,pbk} &= \sum_{g \in G_{pb} \cap G_{pbk}} |\{hf\} \cap \{hf_{h_g}\}| / |G_{pb} \cap G_{pbk}| \\ \#hu_{,pb,pbk} &= \sum_{g \in G_{pb} \cap G_{pbk}} |\{hu\} \cap \{hu_{h_g}\}| / |G_{pb} \cap G_{pbk}| \\ \#vws_{,pb,pbk} &= \sum_{g \in G_{pb} \cap G_{pbk}} \sum_{vw \in VW_{v_g}} |\{vws\} \cap \{vws_{vw}\}| / \sum_{g \in G_{pb} \cap G_{pbk}} |VW_{v_g}| \end{aligned}$$

(H5) Verrohrungswechsel [-]

$$H_5(h, v) = |VVS_v \setminus VVS_{v_g}| \quad (5.37)$$

(H6) Energieträgerwechsel [-]

$$H_6(h, v) = |VES_v \setminus VES_{v_g}| \quad (5.38)$$

(H7) "Illegale" Variante [-]

$$H_7(h, v) = S_2(h, v) \quad (5.39)$$

Indikatoren für Modell A

Im Folgenden werden die Indikatoren aus Tabelle 43 formal beschrieben. Die Indikatoren G1 bis G6 sollen die für das Modell A von Grösche u. a. (2009) notwendigen Daten bereitstellen. Daher ist ihre Definition an diejenige von Grösche u. a. (2009) angelehnt.

(G1) Investition [k€]

Annahme: Es handelt sich bei Grösche u. a. (2009) um die bei \ddot{O}_1 angesetzten Investitionen.

$$G_1(h, v) = \ddot{O}_1(h, v) / 1000 \quad (5.40)$$

(G2) Primärenergiebedarfseinsparung [MWh/a]

Annahme: Es handelt sich bei Grösche u. a. (2009) um den nicht erneuerbaren Anteil.

$$G_2(h, v) = [\ddot{U}_3(h_g, v_g) - \ddot{U}_3(h, v)] * \sum_{w \in W_g} A_w / 1000 \quad (5.41)$$

(G3) Verfügbares Einkommen [€/a]

Annahme: Das verfügbare Einkommen entspricht dem Haushaltsnettoeinkommen.

$$G_3(h, v) = \begin{cases} \sum_{b \in B_{GEB} \cap B_g} EK_b, & \text{wenn } |B_{GEB} \cap B_g| \geq 1 \\ \sum_{b \in B_g} EK_b, & \text{wenn } |B_{GEB} \cap B_g| = 0 \end{cases} \quad (5.42)$$

(G4) Informationszugriff [Anzahl der Energieberater/Anzahl der Eigenheime in einem Umkreis von 20 km]

Annahme: Da die Größe in *AWOHM* nicht bestimmbar ist, wird pauschal die Anzahl der Energieberater in Deutschland bezogen auf die Wohngebäudeanzahl mit 1-2 Wohneinheiten verwendet.

$$G_4(h, v) = ED \quad (5.43)$$

(G5) Energieverbrauch [MWh/a]

Annahme: Es handelt sich bei Grösche u. a. (2009) um den nicht erneuerbaren Primärenergieverbrauch. Dieser wird über den Primärenergiebedarf¹¹⁰ geschätzt.

$$G_5(h, v) = \ddot{U}_3(h, v) * \sum_{w \in W_g} A_w / 1000 \quad (5.44)$$

(G6) Hilfsindikator [-]

$$G_6(h, v) = 1 \quad (5.45)$$

¹¹⁰ Durch entsprechende Anpassung der nutzerverhaltensabhängigen Parameter wird mit der in *AWOHM* verwendeten Energiebedarfsberechnungsprozedur (vgl. Loga & Imkeller-Benjes 1997) auf eine möglichst präzise Abschätzung des Energieverbrauchs abgezielt. Daher werden die Begriffe *Energiebedarf* und *Energieverbrauch* als Synonyme verwendet, sofern nicht gezielt auf Unterschiede zwischen diesen eingegangen wird.

Indikatoren für Modell B

Die Indikatoren A1 bis A16 sollen die für das Modell B von Achtnicht (2011) notwendigen Daten bereitstellen. Daher ist ihre Definition an diejenige von Achtnicht (2011) angelehnt.

(A1) Investition [€]

Annahme: Es handelt sich bei Achtnicht (2011) um die bei \ddot{O}_1 angesetzten Investitionen.

$$A_1(h, v) = \ddot{O}_1(h, v) \quad (5.46)$$

(A2) Investition in Ostdeutschland [€]

$$A_2(h, v) = A_1(h, v) * Ost_{pb_g} \quad (5.47)$$

(A3) Energieeinsparpotenzial [€/a]

$$A_4(h, v) = (\ddot{O}_3(h_g, v_g) - \ddot{O}_3(h, v)) * \sum_{w \in W_g} A_w \quad (5.48)$$

(A4) Amortisationszeit [a]

$$A_5(h, v) = \ddot{O}_{2a}(h, v) \quad (5.49)$$

(A5) CO₂-Einsparung bei Anlagentechnikwechsel [%]

$$A_5(h, v) = 100 * [1 - U_5(h, v)/U_5(h_g, v_g)] * \max\{(1 - |\{v\} \cap \{v_g\}|) - (1 - |\{h\} \cap \{h_g\}|), 0\} \quad (5.50)$$

(A6) CO₂-Einsparung bei Hüllensanierung [%]

$$A_6(h, v) = 100 * [1 - U_5(h, v)/U_5(h_g, v_g)] * \max\{(1 - |\{h\} \cap \{h_g\}|) - (1 - |\{v\} \cap \{v_g\}|), 0\} \quad (5.51)$$

(A7) Empfehlung von Energieberater [0, 1]

Annahme: Da die Größe in *AWOHM* nicht bestimmbar ist, wird pauschal angenommen, dass keine Empfehlungen durch Energieberater erfolgen.

$$A_7(h, v) = 0 \quad (5.52)$$

(A8) Förderung [0, 1]

$$A_8(h, v) = \text{sgn}(F_{v,h}) \quad (5.53)$$

(A9) Garantiejahre [a]

Annahme: Da die Größe in *AWOHM* nicht bestimmbar ist, wird sie für alle Maßnahmenpakete gleichgesetzt.

$$A_9(h, v) = GJ \quad (5.54)$$

(A10) Nur Anlagentechnikwechsel

$$A_{10}(h, v) = \max\{(1 - |\{v\} \cap \{v_g\}|) - (1 - |\{h\} \cap \{h_g\}|), 0\} \quad (5.55)$$

(A11) Anlagentechnikeinbau nach 2000 und Anlagentechnikwechsel [0,1]

Annahme: Die Wärmeerzeuger stehen in *AWOHM* erst nach Ablauf des Sanierungszyklus zum Austausch an und zählen daher nicht zu den „neueren“ Baujahren.

$$A_{11}(h, v) = 0 \quad (5.56)$$

(A12) Eigentümer jünger als 46 Jahre und Anlagentechnikwechsel [0, 1]

$$A_{12}(h, v) = A_{10}(h, v) * \begin{cases} \sum_{b \in B_{GEB} \cap B_g} \max\{\min\{46 - AL_b, 1\}, 0\}, & \text{wenn } |B_{GEB} \cap B_g| = 1 \\ 0, & \text{sonst} \end{cases} \quad (5.57)$$

(A13) Hoher Bildungsabschluss und Anlagentechnikwechsel [0, 1]

$$A_{13}(h, v) = A_{10}(h, v) * \begin{cases} \sum_{b \in B_{GEB} \cap B_g} \min \{ \max \{ B_{G_b} - 5, 0 \}, 1 \}, & \text{wenn } |B_{GEB} \cap B_g| = 1 \\ 0, & \text{sonst} \end{cases} \quad (5.58)$$

(A14) Hat Pelletkessel und Anlagentechnikwechsel [0, 1]

$$A_{14}(h, v) = A_{10}(h, v) * \text{sgn} \left(\sum_{vw \in VW_{v_g}} PK_{vw s_{vw}} \right) \quad (5.59)$$

(A15) Energiepreisanstiegserwartung und Anlagentechnikwechsel [0 (konstant), 1 (steigend)]

Annahme: Da die Energiepreisanstiegserwartung in *AWOHM* nicht bestimmbar ist, wird sie für alle Entscheider gleichgesetzt.

$$A_{15}(h, v) = A_{10}(h, v) * EAE \quad (5.60)$$

(A16) Kein Bedarf an einer Verbesserung der Gebäudehülle und Anlagentechnikwechsel [0,1]

Annahme: Es besteht kein Bedarf an einer Verbesserung der Gebäudehülle, falls der Endenergiebedarf unterdurchschnittlich ist.

$$A_{16}(h, v) = A_{10}(h, v) * \text{ceil}(\max\{1 - \ddot{O}_8(h_g, v_g), 0\}) \quad (5.61)$$

5.4.4 Sanierungsentscheidungsmodelle

Die Modellierung der Sanierungsentscheidung erfolgt in *AWOHM* je nach Szenario über annahmenbasierte oder empirisch fundierte Sanierungsentscheidungsmodelle. Die Wohngebäudeeigentümer werden dabei jeweils gemäß einer in Entscheidungsansätzen¹¹¹ definierten Logik vorgegebenen parametri-

¹¹¹ Je nach Art der verwendeten Sanierungsentscheidungsmodelle werden Entscheidungsansätze auch als *annahmenbasiert* oder *empirisch (fundiert)* bezeichnet.

sierten Sanierungsentscheidungsmodellen zugeordnet. Die Eigentumsstruktur sowie Eigenschaften der Bewohner, ihrer Wohnsituation und der Eigentümer beeinflussen dabei diese Zuordnung oder gehen als Variablen in die Sanierungsentscheidungsmodelle ein. In den Sanierungsentscheidungsmodellen werden den unterschiedlichen Sanierungsvarianten eines Einzelgebäudes aus Sicht der Wohngebäudeeigentümer mittels einer multikriteriellen Nutzenfunktion Nutzenwerte zugewiesen. Die Nutzenfunktion greift dabei auf den hierarchisch angeordneten Satz von Indikatoren (Dimensionen, Kriterien, Attribute) zurück, der im vorigen Abschnitt beschrieben wurde. Unter Rückgriff auf die klassische Nutzwertanalyse als Methode der Mehrzielentscheidungsunterstützung werden die Attribute ggf. normiert, gewichtet und zu einem Nutzenwert aggregiert, auf dessen Basis die Wahl der Sanierungsvariante erfolgt.¹¹² Es wird angenommen, dass die Entscheider Nutzenmaximierer sind, sodass die Sanierungsvariante mit dem höchsten Nutzenwert ausgewählt wird.

Im Folgenden wird zunächst die Aggregation der Attribute zu Nutzenwerten formal beschrieben. Anschließend werden die Eigentümerstrukturen und die jeweiligen Sanierungsentscheidungsmodelle bzw. Entscheidungsansätze umrissen. Danach wird auf annahmenbasierte Sanierungsentscheidungsmodelle, die auf Potenzialakteurstypen, Entscheidertypen und Entscheiderstrategien basieren, sowie auf empirisch basierte Sanierungsentscheidungsmodelle – jeweils mit den zugehörigen Entscheidungsansätzen – im Detail eingegangen. Abschließend wird die Normierung der Attribute erläutert.

5.4.4.1 Formale Darstellung der Aggregation

Tabelle 50 spezifiziert Indizes, Indexmengen, Gewichtungen und Funktionen, die zur formalen Darstellung der Aggregation der Attribute verwendet werden. Als Aggregationsmethode wird die einfache, sehr transparente, lineare (additive) Aggregation verwendet (vgl. Merz 2011; Nardo u. a. 2005; Debreu 1960).

¹¹² Vgl. *multiattribute value theory* in Belton & Stewart (2003).

Tabelle 50: Indizes, Indexmengen, Gewichtungen und Funktionen zur formalen Darstellung der Aggregation der Indikatoren

Kürzel	Beschreibung
$d \in D$	Dimension
$k \in K$	Kriterium
$a \in A$	Attribut
$A_d \subseteq A$	Menge der Attribute zu Dimension d
$A_k \subseteq A$	Menge der Attribute zu Kriterium k
$A_+ \subseteq A$	Menge von Attributen, bei denen ein größerer Wert zu einem größeren Nutzen führt
$A_- \subseteq A$	Menge von Attributen, bei denen ein größerer Wert zu einem kleineren Nutzen führt
$K_d \subseteq K$	Menge der Kriterien zu Dimension d
$w_{d,g}$	Gewichtung einer Dimension bei einem Einzelgebäude
$w_{k,g}$	Gewichtung eines Kriteriums bei einem Einzelgebäude
$w_{a,g}$	Gewichtung eines Attributs bei einem Einzelgebäude
$u_g(h, v)$	Nutzenfunktion für ein Hüllenpaket und ein Wärmeversorgungspaket eines Einzelgebäudes
$u_{d,g}(h, v)$	Teilnutzenfunktion für ein Hüllen-/Wärmeversorgungspaket eines Einzelgebäudes in einer Dimension
$u_{k,g}(h, v)$	Teilnutzenfunktion für ein Hüllen-/Wärmeversorgungspaket eines Einzelgebäudes in einem Kriterium
$i_{a,g}(h, v)$	Wert eines Attributs für ein Hüllenpaket und ein Wärmeversorgungspaket eines Einzelgebäudes
$v_{a,g}(c)$	Normierungsfunktion eines Attributs für ein Einzelgebäude

Der Nutzwert $u_g(h, v)$ einer Sanierungsvariante eines Einzelgebäudes g – bestehend aus einem Hüllenpaket h und einem Wärmeversorgungspaket v – wird definiert durch¹¹³

$$u_g(h, v) = \sum_{d \in D} w_{d,g} * u_{d,g}(h, v); \forall (h, v) \in H_g \times V_g \quad (5.62)$$

mit $\sum_{d \in D} w_{d,g} = 1$

Gewählt wird die Sanierungsvariante $\widetilde{(h, v)}$ mit

$$u_g(\widetilde{(h, v)}) = \max_{(h,v) \in H_g \times V_g} u_g(h, v) \quad (5.63)$$

¹¹³ Bei den empirischen Modellen A und B stimmen die potenziellen Maßnahmen(pakete) mit denen des stärker differenzierenden *AWOHM* nicht vollständig überein. Zudem wurden die Verteilungsparameter des nicht-deterministischen Teils der Nutzenfunktionen (vgl. Abschnitt 3.2.3) jeweils nicht veröffentlicht. Daher können den *AWOHM*-Maßnahmenpaketen keine Wahrscheinlichkeiten für ihre Auswahl zugeordnet werden. Stattdessen basiert die Entscheidung in *AWOHM*, wie hier dargestellt, auf einer deterministischen Nutzenfunktion, d. h. dem deterministischen Teil der Nutzenfunktionen von Achtnicht (2011) und Grösche u. a. (2009). Dabei werden basierend auf Gemeinsamkeiten zwischen Maßnahmen Parameter übertragen. Bspw. werden für die *Anlagentechnik* geschätzte Parameter in *AWOHM* für *Öl-* und *Gaskessel*/bzw. für *Niedertemperatur-* und *Brennwertkessel* verwendet. Dieses Vorgehen basiert auf einer anwendungsorientierten Interpretation der Nutzenfunktionen. Mit dieser Interpretation ist allerdings eine Loslösung von der statistischen Interpretation und statistischen Gütemaßen verbunden. Im Rahmen der Modellanwendung in Kapitel 7 werden die Ergebnisse daher entsprechend hinterfragt.

Die Teilnutzen der Dimensionen *Wirtschaftlichkeit*, *Umwelt*, *Sonstiges*, *Hemmnisse*, *Dimension Modell A* und *Dimension Modell B* (vgl. Tabelle 42 und Tabelle 43) werden dabei bestimmt, gewichtet und summiert. Sie ergeben sich gemäß

$$u_{d,g}(h, v) = \sum_{k \in K_d} w_{k,g} * u_{k,g}(h, v) ; \forall (h, v) \in H_g \times V_g, \quad (5.64)$$

$$\forall d \in D$$

mit $\sum_{k \in K_d} w_{k,g} = 1; \forall d \in D$

Sie basieren auf den Teilnutzen der Kriterien, die sich wiederum ergeben gemäß

$$u_{k,g}(h, v) = \sum_{a \in A_k} w_{a,g} * v_{a,g}(i_{a,g}(h, v)); \forall (h, v) \in H_g \times V_g, \quad (5.65)$$

$$\forall k \in K$$

Für den Wert $i_{a,g}$ eines Attributs a eines Einzelgebäudes gilt

$$i_{a,g}: H_g \times V_g \rightarrow R, (h, v) \rightarrow i_{a,g}(h, v) \quad (5.66)$$

Für die Bestimmung der Gewichtungen $w_{a,g}$, $w_{k,g}$ und $w_{d,g}$ kann annahmenbasiert ein auf Entscheidertypen und -strategien basierender Ansatz sowie empirisch fundiert ein auf Modell A und B basierender Ansatz (vgl. Abschnitt 5.4.3) eingesetzt werden. Die Gewichtungen werden für jedes Einzelgebäude (teilweise) in Abhängigkeit von den Eigenschaften des Einzelgebäudes g , der Wohnungen $w \in W_g$ und der Bewohner $b \in B_w$ sowie von den Szenarien bzw. im Falle des auf Modell A oder B basierenden Ansatzes auch in Abhängigkeit von der Sanierungsvariante bestimmt.

Für den auf Entscheidertypen und -strategien basierenden Ansatz gilt (vgl. Tabelle 42)

$$D = \{\text{Wirtschaftlichkeit, Umwelt, Sonstiges, Hemmnisse}\} \quad (5.67)$$

Die Menge K der Kriterien und die Menge A der Attribute sind ebenfalls auf die zu diesen Dimensionen gehörenden Kriterien und Attribute beschränkt (vgl. Tabelle 42).

Zudem wird gefordert

$$\sum_{a \in A_k} w_{a,g} = 1, \forall k \in K \quad (5.68)$$

Die Normierungsfunktion $v_{a,g}$ eines Attributs a für ein Einzelgebäude g dient der Normierung des Attributwerts $i_{a,g}$ (vgl. Merz 2011; Nardo u. a. 2005). Für $v_{a,g}$ gilt

$$v_{a,g}: R \rightarrow [0,1], i_{a,g}(h, v) \rightarrow v_{a,g}(i_{a,g}(h, v)); \forall a \in A \quad (5.69)$$

Insgesamt folgt aus obigen Anforderungen, dass

$$v_g(h, v) \in [0,1]; \forall (h, v) \in H_g \times V_g \quad (5.70)$$

Für den auf Modell A und Modell B basierenden Ansatz gilt (vgl. Tabelle 43)

$$D = \{Dimension\ Modell\ A, Dimension\ Modell\ B\} \quad (5.71)$$

Die Menge K der Kriterien und die Menge A der Attribute sind ebenfalls auf die zu diesen Dimensionen gehörenden Kriterien und Attribute beschränkt (vgl. Tabelle 43).

Es gilt

$$(w_{Dimension\ Modell\ A,g} = 1) \vee (w_{Dimension\ Modell\ B,g} = 1) \quad (5.72)$$

$$(w_{Kriterium\ Modell\ A,g} = 1) \wedge (w_{Kriterium\ Modell\ B,g} = 1) \quad (5.73)$$

Eine Normierung ist bei diesem Ansatz nicht notwendig. Daher entspricht die Normierungsfunktion $v_{a,g}$ eines Attributs a der Identitätsfunktion. Für $v_{a,g}$ gilt

$$v_{a,g}: R \rightarrow R, i_{a,g}(h, v) \rightarrow v_{a,g}(i_{a,g}(h, v)) = i_{a,g}(h, v); \forall a \in A \quad (5.74)$$

5.4.4.2 Eigentümerstrukturen und Entscheidungsansätze

Anwendbarkeit und Anwendung der Sanierungsentscheidungsmodelle (bzw. der Entscheidungsansätze) hängen von den Eigentümerstrukturen der Gebäude ab. Für die Modellierung der Sanierungsentscheidung werden in Anlehnung an Kapitel 4 und unter Berücksichtigung der Datenlage die folgenden Eigentümerstrukturen differenziert:

- A **Rein selbstnutzende Eigentümer** sind zugleich Eigentümer und Bewohner von Wohngebäuden, typischerweise von Reihenhäusern und Einfamilienhäusern. Hinsichtlich energetischer Modernisierungen tätigen sie die Investition und profitieren direkt durch einen niedrigeren Energiebedarf und einen eventuell höheren Wohnkomfort.

- B **Selbstnutzende Eigentümergemeinschaften** sind ebenfalls zugleich Eigentümer und Bewohner von Wohngebäuden mit mehreren Wohneinheiten. Hinsichtlich energetischer Modernisierungen tätigen sie die Investition und profitieren direkt durch einen niedrigeren Energiebedarf und einen eventuell höheren Wohnkomfort. Allerdings wird die Entscheidungsfindung bei dieser Eigentumssituation im Vergleich zum Einzeleigentümer erschwert.
- C **Amateurvermieter mit teils selbstgenutztem Gebäude** sind zugleich Eigentümer, Nutzer und Vermieter von Gebäuden mit mindestens zwei Wohneinheiten. Hinsichtlich energetischer Modernisierungen tätigen sie die Investition, profitieren teilweise direkt durch einen niedrigeren Energiebedarf und einen eventuell höheren Wohnkomfort sowie teilweise indirekt durch eine Modernisierungsumlage und eine Verringerung des Leerstandsrisikos.
- D **Amateurvermieter mit vollständig vermieteten Gebäuden** sind als Privatpersonen zugleich Eigentümer und Vermieter, typischerweise von Mehrfamilienhäusern und großen Mehrfamilienhäusern. Hinsichtlich energetischer Modernisierungen tätigen sie die Investition und profitieren indirekt – durch eine Modernisierungsumlage und eine Verringerung des Leerstandsrisikos – an einem niedrigeren Energiebedarf und einem eventuell höheren Wohnkomfort.
- E **Professionelle oder institutionelle Vermieter** sind als Unternehmen oder Privatpersonen zugleich Eigentümer und Vermieter, typischerweise von Mehrfamilienhäusern, großen Mehrfamilienhäusern und Hochhäusern. Hinsichtlich energetischer Modernisierungen tätigen sie die Investition und profitieren indirekt – durch eine Modernisierungsumlage und eine Verringerung des Leerstandsrisikos – an einem niedrigeren Energiebedarf und einem eventuell höheren Wohnkomfort.

Für die Simulation der Sanierungsentscheidung wird in *AWOHM* jedes Gebäude genau einer dieser Eigentümerstrukturen zugeordnet. Eine Übersicht über

das Vorgehen bei der Zuordnung gibt Tabelle 51. Basis für die Zuordnung sind die Eigentumsverhältnisse (vgl. Abschnitt 5.3.2) bez. der 1. Wohnung (im Fragebogen des Mikrozensus) des Gebäudes. Ist der Bewohner (Haushalt) der 1. Wohnung Eigentümer des Gebäudes, so handelt es sich im Falle eines Reihen- oder Einfamilienhauses um einen *rein selbstnutzenden Eigentümer* und im Falle eines Gebäudes mit mehr Wohneinheiten um einen *Amateurvermieter mit teils selbstgenutztem Gebäude*. Ist der Bewohner Eigentümer der Wohnung, so wird von einer *selbstnutzenden Eigentümergemeinschaft* ausgegangen (auch wenn die Wohnungen des Gebäudes teilweise vermietet sind). Ist der Bewohner der 1. Wohnung ein Haupt- oder Untermieter, so wird von einem *Amateurvermieter mit vollständig vermieteten Gebäuden* bzw. einem *professionellen oder institutionellen Vermieter* ausgegangen. Für die Differenzierung dieser beiden Eigentümerstrukturen wird angenommen, dass sich Reihen- und Einfamilienhäuser im Eigentum von Amateurvermietern und große Mehrfamilienhäuser sowie Hochhäuser im Eigentum von professionellen oder institutionellen Vermietern befinden. Bei vollständig vermieteten Mehrfamilienhäusern wird die Zugehörigkeit des Gebäudes zur Eigentümerstruktur durch Zufallsziehung gemäß Tabelle 51 unter der Annahme von gleichen Eigentumsanteilen bestimmt.

Tabelle 51: Zuordnung der *Einzelgebäude* zu den Eigentümerstrukturen (Datengrundlage: Annahmen)

Gebäudetyp	Eigentumsverhältnisse der 1. Wohnung (SUF 2006 EF 491)	Anteil	Eigentümerstruktur	
			Kürzel	Lang
RH/EFH	Eigentümer(in) des Gebäudes (oder der Wohnung)	100%	A	Rein selbstnutzender Eigentümer
	Hauptmieter(in)/Untermieter(in)	100%	D	Amateurvermieter mit vollständig vermieteten Gebäuden
MFH/MFH_NBL	Eigentümer(in) des Gebäudes	100%	C	Amateurvermieter mit teils selbstgenutztem Gebäude
	Eigentümer(in) der Wohnung	100%	B	Selbstnutzende Eigentümergemeinschaften
	Hauptmieter(in)/Untermieter(in)	50%	D	Amateurvermieter mit vollständig vermieteten Gebäuden
		50%	E	Professioneller oder institutioneller Vermieter
GMH/GMH_NBL/HH/HH_NBL	Eigentümer(in) des Gebäudes	100%	C	Amateurvermieter mit teils selbstgenutztem Gebäude
	Eigentümer(in) der Wohnung	100%	B	Selbstnutzende Eigentümergemeinschaften
	Hauptmieter(in)/Untermieter(in)	100%	E	Professioneller oder institutioneller Vermieter

Die Charakterisierung der Sanierungsentscheidung erfolgt differenziert nach den Eigentümerstrukturen A bis E durch ein Quintupel.¹¹⁴ Jedes dieser Quintupel ist Teil eines Szenarios und ordnet jeder der fünf Eigentümerstrukturen einen Entscheidungsansatz und darüber ein oder mehrere Sanierungsentscheidungsmodelle zu. Als Entscheidungsansatzarten bzw. Sanierungsentscheidungsmodellarten werden *annahmenbasierte* sowie *empirisch fundierte* Ansätze unterschieden. Da nicht jede Entscheidungsansatzart bei jeder Eigentümerstruktur anwendbar ist, gibt Tabelle 52 eine Übersicht über die anwendbaren Entscheidungsansatzarten je Eigentümerstruktur.

Tabelle 52: Anwendbare Entscheidungsansatzarten je Eigentümerstruktur; X: anwendbar; -: nicht anwendbar

Entscheidungsansatzarten (bzw. Sanierungsentscheidungsmodellarten)		Eigentümerstruktur				
		A	B	C	D	E
		Rein selbstnutzender Eigentümer	Selbstnutzende Eigentümergemeinschaften	Amateurvermieter mit teils selbstgenutztem Gebäude	Amateurvermieter mit vollständig vermieteten Gebäuden	Professioneller oder institutioneller Vermieter
Annahmenbasiert	Potenzialakteurstypen	X	X	X	X	X
	Entscheidertypen	X	X	-	-	-
	Entscheiderstrategien	-	-	X	X	X
Empirisch fundiert	Modell A	X	-	-	-	-
	Modell B	X	-	-	-	-

Potenzialakteurstypen dienen der Bestimmung technischer und ökonomischer Potenziale. Sie können prinzipiell bei jeder Eigentümerstruktur eingesetzt werden. Für die Abschätzung der ausschöpfbaren Potenziale können Entscheidertypen und -strategien eingesetzt werden. Entscheidertypen dienen dabei der Charakterisierung der Sanierungsentscheidung von Selbstnutzern. Das Äquivalent bei den Vermietern wird als Entscheiderstrategien bezeichnet. Die Modelle A und B (vgl. Abschnitt 5.4.3) stellen eine Alternative zu den Entscheidertypen dar, mit der die ausschöpfbaren Potenziale abgeschätzt werden können. Durch den Vergleich der Modellergebnisse bei unterschiedlichen Ansätzen kann die Unsicherheit bzw. die Robustheit der Modellaussagen analy-

¹¹⁴ Bei den Eigentümerstrukturen C und D wird in dieser Arbeit allerdings immer derselbe Entscheidungsansatz verwendet.

siert werden. Die empirisch fundierten Modelle können nur für die Charakterisierung rein selbstnutzender Eigentümer eingesetzt werden (vgl. Kapitel 3). Im Folgenden werden die in *AWOHM* verwendeten Sanierungsentscheidungsmodelle, die zugehörigen Entscheidungsansätze sowie die jeweilige Parametrisierung im Detail vorgestellt.

5.4.4.3 Potenzialaktorstypen (Selbstnutzer und Vermieter)

Über Potenzialaktorstypen werden Sanierungsentscheidungsmodelle (und darüber Entscheidungsansätze) definiert, die es ermöglichen, technische und ökonomische Potenziale zu bestimmen. Zur Bestimmung technischer Potenziale werden alle Gebäudeeigentümer einer oder mehrerer Eigentümerstrukturen einem Potenzialaktorstyp zugeordnet und handeln gemäß dessen Entscheidungslogik. Tabelle 53 gibt eine Übersicht über die betrachteten Potenzialaktorstypen mit den jeweiligen Gewichtungen $w_{d,g}$, $w_{k,g}$ und $w_{a,g}$ differenziert nach technischen und ökonomischen Potenzialen. Wird bspw. allen Eigentümerstrukturen der Potenzialaktorstyp *Min Primärenergiebedarf* zugeordnet, so wird bei jedem Gebäude diejenige Sanierungsvariante gewählt, die den niedrigsten Primärenergiebedarf für Raumwärme und Warmwasser zur Folge hat. Somit kann das technische Potenzial für die Primärenergiebedarfsminderung quantifiziert werden. Analog können die technischen Potenziale für die Minderung von CO₂, CH₄, PM, NO_x, SO₂, NMVOC und vom nicht erneuerbaren Primärenergiebedarf bestimmt werden. Da Zielkonflikte zwischen diesen Potenzialen existieren können, wird mit dem Potenzialaktorstyp *Technischer Kompromiss* ein Kompromiss zwischen den durch die Minimierung eines Attributs definierten Potenzialaktorstypen angestrebt. Die genaue Spezifikation dieses Typs erfolgt in Abhängigkeit von den im Rahmen der Modellanwendung in Kapitel 7 aufgedeckten Zielkonflikten.

Bei der Bestimmung ökonomischer Potenziale wird primär von einer Auswahl der Sanierungsvariante gemäß Kapitalwert ausgegangen. Da dieser jedoch von der Sichtweise abhängt, werden jeweils Potenzialaktorstypen für Selbstnutzer, Vermieter und Mieter unterschieden. Zudem wird ein *techno-*

ökonomischer Kompromiss als Kompromiss zwischen Wirtschaftlichkeit und Umwelt definiert. Bei diesem wird implizit die Sicht der Gesellschaft eingenommen, die bspw. etwaige externe Kosten zu tragen hat. Jede Eigentümerstruktur wird zur Bestimmung ökonomischer Potenziale vollständig einem dieser Potenzialakteurstypen zugeordnet.

Tabelle 53: Potenzialarten und Potenzialakteurstypen (Datengrundlage: Annahmen)

Potenzialart	Potenzialakteurstyp	Gewichtungen (alle nicht aufgeführten sind 0)				
		$W_{d,g}$	$W_{k,g}$	$W_{a,g}$		
Technisch	Min CO ₂	$W_{Umwelt,g} = 1$	$W_{Klimaschutz,g} = 1$	$W_{CO_2\text{-Emissionen},g} = 1$		
	Min CH ₄			$W_{CH_4\text{-Emissionen},g} = 1$		
	Min PM			$W_{Luftreinhaltung,g} = 1$	$W_{PM\text{-Emissionen},g} = 1$	
	Min NO _x				$W_{NO_x\text{-Emissionen},g} = 1$	
	Min SO ₂				$W_{SO_2\text{-Emissionen},g} = 1$	
	Min NMVOC				$W_{NMVOC\text{-Emissionen},g} = 1$	
	Min nicht erneuerbarer Primärenergiebedarf			$W_{Energiebedarf,g} = 1$	$W_{N.ernb.Primärenergiebedarf,g} = 1$	
	Min Primärenergiebedarf				$W_{Primärenergiebedarf,g} = 1$	
	Technischer Kompromiss			Wird in Abhängigkeit von den Zielkonflikten gesetzt		
	Ökonomisch			Max Kapitalwert – Selbstnutzersicht	$W_{Wirtsch.,g} = 1$	$W_{Voraus.,Sichtweise,g} = 1$
Max Kapitalwert – Vermietersicht		$W_{Kapitalwert\ aus\ Vermietersicht,g} = 1$				
Max Barwert ¹¹⁵ – Mietersicht		$W_{Barwert\ aus\ Mietersicht,g} = 1$				
Techno-ökonomischer Kompromiss (repräsentiert das ökonomische Potenzial aus Gesellschaftssicht)		$W_{Umwelt,g} = 1/2$	Wird in Abhängigkeit von den Zielkonflikten gesetzt			
	$W_{Wirtsch.,g} = 1/2$	$W_{Voraus.,Sichtweise,g} = 1$	$W_{Kapitalwert\ aus\ Selbstnutzersicht,g} = 1$			

5.4.4.4 Entscheidertypen (Selbstnutzer)

Um die ausschöpfbaren Potenziale im Bereich des selbstgenutzten Wohneigentums abschätzen zu können, werden in Anlehnung an Stengel u. a. (2012) sowie Kapitel 4 vier transparente, *annahmenbasierte* Entscheidertypen definiert, die das reale Investitionsverhalten der Gebäudeeigentümer typisieren sollen. Die Gewichtungen zu den vier im Folgenden charakterisierten Entscheidertypen sind Tabelle 54 zu entnehmen.

¹¹⁵ Da Mieter in *AWOHM* keine Investition tätigen, wird vom Barwert der Ausgaben und nicht vom Kapitalwert gesprochen.

- **Ausbesserer:** Minimierung der Investition.
- **Mindestmaßsanierer:** Auswahl einer legalen Sanierungsvariante mit niedriger Investition und geringem Abstand zur vorhergehenden Konfiguration.
- **Ökonom:** Auswahl einer legalen Sanierungsvariante als Kompromiss zwischen Kapitalwert und Amortisationszeit, sofern ausreichend Eigenkapital zur Verfügung steht.
- **Ökomodernisierer:** Minimierung des nicht erneuerbaren Primärenergiebedarfs.

Tabelle 54: Gewichtungen der Entscheidertypen selbstnutzender Eigentümer (Datengrundlage: Annahmen); *: Maßnahmenpaketen mit und ohne Partikelabscheider wird derselbe Nutzen zugewiesen. Sofern zulässig, wird die Variante ohne Partikelabscheider gewählt.

Entscheidertyp	Gewichtungen (alle nicht aufgeführten sind 0)		
	$W_{d,g}$	$W_{k,g}$	$W_{a,g}$
Ausbesserer	$W_{Wirtsch,g} = 1$	$W_{Kurzfr. Sichtweise,g} = 1$	$W_{Investition,g} = 1$
Mindestmaßsanierer	$W_{Wirtsch,g} = 1/4$	$W_{Kurzfr. Sichtweise,g} = 1$	$W_{Investition,g} = 1$
	$W_{Hemmnisse,g} = 3/4$	$W_{Abst. v. vorheriger Technik,g} = 1/3$	$W_{Verrohrungswechsel,g} = 1/2$
			$W_{Energieträgerwechsel,g} = 1/2$
Ökonom		$W_{Illegaltät,g} = 2/3$	$W_{Illegale Variante,g} = 1$
	$W_{Wirtsch,g} = 1/2$	$W_{Mittlere Sichtweise,g} = 1/2$	$W_{Amortisationszeit aus Selbstnutzerg} = 1$
		$W_{Voraus. Sichtweise,g} = 1/2$	$W_{Kapitalwert aus Selbstnutzersicht,g} = 1$
	$W_{Hemmnisse,g} = 1/2$	$W_{Finanzierung,g} = 1/3$	$W_{Invest./Verfügb. Eink. der Bew.g} = 1$
Ökomodernisierer*		$W_{Illegaltät,g} = 2/3$	$W_{Illegale Variante,g} = 1$
	$W_{Umwelt,g} = 1$	$W_{Energiebedarf,g} = 1$	$W_{Nicht ern. Primärenergiebedarf,g} = 1$

Jedem selbstnutzenden Gebäudeeigentümer (bzw. jeder Eigentümergemeinschaft) wird einer dieser Entscheidertypen zugeordnet. Je nach Zuordnungslogik ergeben sich dabei Entscheidungsansätze, bei denen alle Eigentümer vom selben Entscheidertyp sind oder unterschiedlichen Entscheidertypen entsprechen. Die für die Simulation der ausschöpfbaren Potenziale mittels Entscheidertypen bei Selbstnutzern verwendeten Entscheidungsansätze sind in Tabelle 55 dargestellt. Zu jedem Entscheidertyp wird ein Entscheidungsansatz definiert, bei dem alle Gebäudeeigentümer einer Eigentümerstruktur von diesem Typ sind. Damit ergeben sich die vier Entscheidungsansätze *Ausbesserer*, *Mindestmaßsanierer*, *Ökonom* und *Ökomodernisierer*. Zudem werden für rein selbstnutzende Eigentümer zwei weitere Entscheidungsansätze, *Zufallszie-*

lung *Stieß* und *Zufallsziehung Selbstnutzer Stengel*, betrachtet, bei denen die Entscheidertypen den Gebäudeeigentümern über eine Zufallsziehung zugeordnet werden.

Tabelle 55: Entscheidungsansätze mittels Entscheidertypen bei Selbstnutzern

Entscheidungsansatz	Wahrscheinlichkeiten
Ausbesserer	100% Ausbesserer
Mindestmaßsanierer	100% Mindestmaßsanierer
Ökonom	100% Ökonom
Ökomodernisierer	100% Ökomodernisierer
Zufallsziehung Stieß	Wahrscheinlichkeiten $p_{g,z}$ (vgl. Tabelle 56)
Zufallsziehung Selbstnutzer Stengel	Wahrscheinlichkeiten gemäß Stengel u. a. (2012)

Zufallsziehung Stieß

Im Entscheidungsansatz *Zufallsziehung Stieß* wird die Häufigkeit der jeweiligen Entscheidertypen unter den Selbstnutzern basierend auf deren Zuordnung zu Zielgruppen für die energetische Modernisierung von Eigenheimen (vgl. Albrecht u. a. 2010; Stieß u. a. 2010; Weiß & Dunkelberg 2010) abgeschätzt. Tabelle 56 fasst diese Zuordnung sowie die Häufigkeit der Zielgruppen differenziert nach Baualtersklassen zusammen.

Die Zuordnung konkreter Gebäude zu den Zielgruppen und damit zu den Entscheidertypen erfolgt durch Zufallsziehung auf Basis der Baualtersklasse. Die Wahrscheinlichkeit $p_{g,z}$, dass ein selbstgenutztes Gebäude g mit dem Baujahr BJ_g Eigentum einer Zielgruppe $z = 1, \dots, 5$ ist, entspricht dem Anteil $p_{[BJ_g],z}$ der Zielgruppe an der Baualtersklasse $[BJ_g]$, zu der BJ_g gehört (vgl. Tabelle 56).

$$p_{g,z} = p_{[BJ_g],z} \tag{5.75}$$

Tabelle 56: Zuordnung der Entscheidertypen zu Zielgruppen und Häufigkeit differenziert nach Baualtersklassen im Entscheidungsansatz *Zufallsziehung Stieß* (auf Basis von: Albrecht u. a. 2010; Stieß u. a. 2010; Weiß & Dunkelberg 2010; Datengrundlage: Weiß & Dunkelberg 2010)

Entscheidertyp	Zielgruppe für die energetische Modernisierung aus der Literatur	Baualtersklasse				
		Bis 1968	1969-1978	1979-1994	Ab 1995	Alle
Ausbesserer	Desinteressiert Unwillige	13%	14%	15%	13%	14%
Mindestmaßsanierer	Unreflektierte Instandhalter	16%	30%	40%	47%	32%
	Engagierte Wohnwertoptimierer					
Ökonom	Aufgeschlossene Skeptiker	38%	28%	27%	12%	29%
Ökomodernisierer	Überzeugte Energiesparer	33%	28%	18%	28%	25%

Nach Tabelle 57 ist die Zielgruppenzugehörigkeit nicht unabhängig von den Merkmalen Altersklasse, Haushaltsgröße, Einkommen und bisherige Wohndauer. Daher könnte der Entscheidungsansatz *Zufallsziehung Stieß* dahingehend modifiziert werden, dass Gebäude denjenigen Zielgruppen (und damit Entscheidungstypen) zugeordnet werden, die den Gebäudeeigentümern hinsichtlich Alter, Haushaltsgröße, Einkommen und bisheriger Wohndauer am ähnlichsten sind. Allerdings liegen zu den Abhängigkeiten nur qualitative Informationen vor und diese Merkmale sind teilweise nicht unabhängig von der Baualtersklasse (vgl. Kapitel 4), weshalb im Entscheidungsansatz *Zufallsziehung Stieß* ausschließlich die quantitativ vorliegenden Zielgruppenhäufigkeiten in Abhängigkeit von den Baualtersklassen verwendet werden.

Tabelle 57: Altersklassen, Haushaltsgrößen, Einkommen und bisherige Wohndauern, die in den Zielgruppen überrepräsentiert sind (+) (auf Basis von: Albrecht u. a. 2010; Stieß u. a. 2010; Weiß & Dunkelberg 2010)

Zielgruppe z nach Stieß u. a. (2010)	Altersklasse der Haushaltsvorstände [Jahre]			Haushaltsgröße [Personen]			Einkommen		Bisherige Wohndauer [Jahre]	
	<50	50-60	>60	1	2	>2	Nicht hoch	Hoch	≤10	11-30
Desinteressiert Unwillige			+	+		+		+		+
Unreflektierte Instandhalter		+	+		+					+
Aufgeschlossene Skeptiker		+	+							+
Überzeugte Energiesparer	+					+				+
Engagierte Wohnwertoptimierer	+									

Zufallsziehung Selbstnutzer Stengel

Im Entscheidungsansatz *Zufallsziehung Selbstnutzer Stengel* erfolgt die Zuordnung selbstgenutzter Gebäude zu den Entscheidungstypen mittels einer Zufallsziehung auf Basis der über die Selbstnutzer im Gebäude gemittelten Werte für das Alter des Haupteinkommensbeziehers, Haushaltsnettoeinkommen und Haushaltsgröße. Die *annahmenbasierten* Zuordnungswahrscheinlichkeiten wurden von Stengel u. a. (2012) übernommen, wobei die dortigen Entscheidungstypen *Ökonom mit hoher bzw. niedriger Renditeforderung* unter *Ökonom* zusammengefasst wurden. Tabelle 58 fasst die Zuordnungswahrscheinlichkeiten zusammen. Über diesen Ansatz können somit auch Abhängigkeiten zwischen der Sanierungsentscheidung und sozio-demographischen Charakteristi-

ka (vgl. Kapitel 4) bzw. alters-, einkommens- und lebensphasenbedingte Hemmnisse in *AWOHM* berücksichtigt werden.

Tabelle 58: Wahrscheinlichkeiten für die Zuordnung von Selbstnutzern zu Entscheider-typen im *Entscheidungsansatz Selbstnutzer Stengel* (in Anlehnung an: Stengel u. a. 2012; Datengrundlage: Stengel u. a. 2012 bzw. Annahmen)

Altersklasse des Haupt-einkommens-beziehers [Jahre]	Haushalts-nettoein-kommen [€/Monat]	HH-Größe [Personen]	Ausbesserer	Mindestmaßsa-nierier	Ökonom	Ökomodernisie-rer	
<35	<1.500	1	100%	0%	0%	0%	
		2	100%	0%	0%	0%	
		3	100%	0%	0%	0%	
		4	100%	0%	0%	0%	
		>5	100%	0%	0%	0%	
	1.500-3.200	1	0%	50%	33%	17%	
		2	20%	40%	27%	13%	
		3	40%	30%	20%	10%	
		4	60%	20%	13%	7%	
		<5	80%	10%	7%	3%	
	>3.200	1	0%	17%	33%	50%	
		2	0%	17%	33%	50%	
		3	0%	17%	33%	50%	
		4	0%	17%	33%	50%	
		<5	0%	17%	33%	50%	
	35-53	<1.500	1	100%	0%	0%	0%
			2	100%	0%	0%	0%
3			100%	0%	0%	0%	
4			100%	0%	0%	0%	
<5			100%	0%	0%	0%	
1.500-3.200		1	0%	58%	33%	8%	
		2	20%	47%	27%	7%	
		3	40%	35%	20%	5%	
		4	60%	23%	13%	3%	
		<5	80%	12%	7%	2%	
>3.200		1	0%	33%	33%	33%	
		2	0%	33%	33%	33%	
		3	0%	33%	33%	33%	
		4	0%	33%	33%	33%	
		<5	0%	33%	33%	33%	
>53		<1.500	1	100%	0%	0%	0%
			2	100%	0%	0%	0%
	3		100%	0%	0%	0%	
	4		100%	0%	0%	0%	
	<5		100%	0%	0%	0%	
	1.500-3.200	1	40%	35%	20%	5%	
		2	40%	35%	20%	5%	
		3	40%	35%	20%	5%	
		4	60%	23%	13%	3%	
		<5	80%	12%	7%	2%	
	>3.200	1	30%	41%	18%	12%	
		2	30%	41%	18%	12%	
		3	20%	47%	20%	13%	
		4	10%	53%	23%	15%	
		<5	10%	53%	23%	15%	

Die quantitativen Zuordnungswahrscheinlichkeiten basieren allerdings auf einer qualitativen Argumentation und sind damit annahmenbasiert. Nach Stengel u. a. (2012) liegen den Zuordnungswahrscheinlichkeiten die folgenden Annahmen zugrunde:

- Selbstnutzende Eigentümer mit *niedrigem Haushaltsnettoeinkommen* können keine hinreichenden finanziellen Mittel für eine energetische Modernisierung aufbringen.
- Bei *mittlerem Haushaltsnettoeinkommen* stehen prinzipiell hinreichende finanzielle Mittel zur Verfügung, wobei bei steigender Haushaltsgröße die finanziellen Restriktionen stärker werden. Ein Großteil der durchgeführten Sanierungen entspricht aufgrund der finanziellen Restriktionen den gesetzlichen Mindestanforderungen.
- Bei *hohen Haushaltseinkommen* wird angenommen, dass die Bereitschaft und die Fähigkeit, in umweltfreundlichere Alternativen zu investieren, höher sind.
- In allen Einkommensklassen nehmen bei hohem Alter des Haupteinkommensbeziehers die Anteile der Ökomodernisierer ab und die der Ausbesserer zu. Dies kann beispielsweise durch kürzere Planungshorizonte begründet werden.

5.4.4.5 Entscheiderstrategien (Vermieter)

Um die ausschöpfbaren Potenziale auch im Bereich des vermieteten Wohneigentums abschätzen zu können, werden in Anlehnung an Stengel u. a. (2012) sowie Kapitel 4 fünf transparente Entscheiderstrategien definiert. Die Gewichtungen zu den fünf im Folgenden charakterisierten Entscheiderstrategien sind Tabelle 59 zu entnehmen.

- **Abbruchstrategie:** Minimierung der Investitionen.
- **Substanzerhaltungsstrategie Basis:** Auswahl einer legalen Sanierungsvariante mit niedriger Investition und geringem Abstand zur vorhergehenden Konfiguration.

- **Substanzerhaltungsstrategie Erweitert:** Auswahl einer legalen Sanierungsvariante als Kompromiss zwischen Kapitalwert und Amortisationszeit aus Selbstnutzersicht. Dabei wird implizit unterstellt, dass der Vermieter die Energiekostenreduktion auf die Kaltmiete umlegen kann.
- **Langfristige Modernisierungsstrategie:** Auswahl der Sanierungsvariante mit dem höchsten Kapitalwert aus Selbstnutzersicht.
- **Ökomodernisierungsstrategie:** Minimierung des nicht erneuerbaren Primärenergiebedarfs.

Tabelle 59: Gewichtungen der Entscheiderstrategien von Vermietern (Datengrundlage: Annahmen); *: Maßnahmenpaketen mit und ohne Partikelabscheider wird derselbe Nutzen zugewiesen. Sofern zulässig, wird die Variante ohne Partikelabscheider gewählt.

Entscheiderstyp	Gewichtungen (alle nicht aufgeführten sind 0)		
	$w_{d,g}$	$w_{k,g}$	$w_{a,g}$
Abbruchstrategie	$w_{Wirtsch,g} = 1$	$w_{Kurzfr. Sichtweise,g} = 1$	$w_{Investition,g} = 1$
Substanzerhaltungsstrategie Basis	$w_{Wirtsch,g} = 1/4$	$w_{Kurzfr. Sichtweise,g} = 1$	$w_{Investition,g} = 1$
	$w_{Hemmnisse,g} = 3/4$	$w_{Abst. v. vorheriger Technik,g} = 1/3$	$w_{Verrohrungswechsel,g} = 1/2$
		$w_{Illegaltät,g} = 2/3$	$w_{Energieträgerwechsel,g} = 1/2$
Substanzerhaltungsstrategie Erweitert	$w_{Wirtsch,g} = 1$	$w_{Mittlere Sichtweise,g} = 1/2$	$w_{Amortisationszeit aus Selbstnutzers,g} = 1$
		$w_{Vorauss. Sichtweise,g} = 1/2$	$w_{Kapitalwert aus Selbstnutzersicht,g} = 1$
Langfristige Modernisierungsstrategie	$w_{Wirtsch,g} = 1$	$w_{Vorauss. Sichtweise,g} = 1$	$w_{Kapitalwert aus Selbstnutzersicht,g} = 1$
Ökomodernisierungsstrategie*	$w_{Umwelt,g} = 1$	$w_{Energiebedarf,g} = 1$	$w_{Nicht ern. Primärenergiebedarf,g} = 1$

Inwieweit die Modernisierungsumlage die Energiekostenreduktion über- bzw. unterschreiten kann, hängt insbesondere vom Marktumfeld ab und kann daher nicht modellendogen bestimmt werden. Die Höhe der Modernisierungsumlage beeinflusst in *AWOHM* daher nicht die Entscheidung, sondern die Bewertung der Entwicklungspfade und wird in Szenarien variiert.

Jedem vermieteten Gebäude bzw. dessen Eigentümer wird eine dieser Entscheiderstrategien zugeordnet. Je nach Zuordnungslogik ergeben sich dabei Entscheidungsansätze, bei denen alle Gebäude nach derselben Entscheiderstrategie saniert werden oder nach unterschiedlichen. Die für die Simulation der ausschöpfbaren Potenziale mittels Entscheiderstrategien bei vermieteten Gebäuden verwendeten Entscheidungsansätze sind in Tabelle 60 darge-

stellt. Zu jeder Entscheiderstrategie wird ein Entscheidungsansatz definiert, bei dem alle Gebäudeeigentümer einer Eigentümerstruktur nach dieser Strategie handeln. Damit ergeben sich die fünf Entscheidungsansätze *Abbruchstrategie*, *Substanzerhaltungsstrategie Basis*, *Substanzerhaltungsstrategie Erweitert*, *Langfristige Modernisierungsstrategie* und *Ökomodernisierungsstrategie*.

Tabelle 60: Entscheidungsansätze mittels Entscheiderstrategien bei Vermietern

Entscheidungsansatz	Wahrscheinlichkeiten
Abbruchstrategie	100% Abbruchstrategie
Substanzerhaltungsstrategie Basis	100% Substanzerhaltungsstrategie Basis
Substanzerhaltungsstrategie Erweitert	100% Substanzerhaltungsstrategie Erweitert
Langfristige Modernisierungsstrategie	100% Langfristige Modernisierungsstrategie
Ökomodernisierungsstrategie	100% Ökomodernisierungsstrategie
Zufallsziehung Schätzl	Wahrscheinlichkeiten aus Tabelle 61
Zufallsziehung Vermieter Stengel	Wahrscheinlichkeiten gemäß Stengel u. a. (2012)

Zudem werden bei Vermietern zwei weitere Entscheidungsansätze, *Zufallsziehung Schätzl* und *Zufallsziehung Vermieter Stengel*, betrachtet, bei denen die Entscheidertypen den Gebäudeeigentümern über eine Zufallsziehung zugeordnet werden.

Zufallsziehung Schätzl

Im Entscheidungsansatz *Zufallsziehung Schätzl* erfolgt die Zuordnung der vermieteten Gebäude zu den Entscheiderstrategien anhand der in Tabelle 61 angegebenen Wahrscheinlichkeiten.

Tabelle 61: Wahrscheinlichkeiten der Zuordnung von Vermietern zu Entscheiderstrategien im Entscheidungsansatz *Zufallsziehung Schätzl* (auf Basis von: Schätzl u. a. 2007; Datengrundlage: Schätzl u. a. 2007)

Entscheiderstrategie	Als wichtigste Planung angegeben (Schätzl u. a. 2007)	Eigentümerstruktur		
		Amateurvermieter mit teils selbstgenutztem Gebäude	Amateurvermieter mit vollständig vermietetem Gebäude	Professioneller oder institutioneller Vermieter
Abbruchstrategie	Keine Planungen, da finanzielle Situation dies nicht zulässt	11%	11%	3%
Substanzerhaltungsstrategie Basis	Ausschließlich nur laufende Instandhaltung	17%	17%	18%
Substanzerhaltungsstrategie Erweitert	Kontinuierliche Instandsetzung und Modernisierung, wenn notwendig	46%	46%	47%
Langfristige Modernisierungsstrategie	Von der Marktlage abhängende Investitionsentscheidungen; Anpassungen der Planungen an Bedürfnisse der Mieter	11% + 16% = 27%	11% + 16% = 27%	14% + 18% = 32%
Ökomodernisierungsstrategie	-	0%	0%	0%

Diese entsprechen den Anteilen der von privaten Amateurvermietern und privaten professionellen Vermietern als wichtigste Planungen angegebenen Punkte (vgl. Schätzl u. a. 2007), die den Entscheiderstrategien zugeordnet wurden. Bei den institutionellen Vermietern werden dieselben Wahrscheinlichkeiten angesetzt wie bei den privaten professionellen Vermietern, da die Einstellung der privatwirtschaftlichen Wohnungsunternehmen nach Testorf u. a. (2010) starke Ähnlichkeiten zu den privaten Vermietern aufweist.

Zufallsziehung Vermieter Stengel

Im Entscheidungsansatz *Zufallsziehung Vermieter Stengel* erfolgt die Zuordnung vermieteter Gebäude zu den Entscheiderstrategien mittels einer Zufallsziehung auf Basis der über die Wohnungen gemittelten Werte für die Bruttokaltmiete, das Haushaltsnettoeinkommen der Mieter und die warmen Nebenkosten. Die Zuordnungswahrscheinlichkeiten wurden von Stengel u. a. (2012) übernommen, wobei die dortigen Entscheiderstrategien *Substanzerhaltungsstrategie*, *Wertvermehrungsstrategie mit hohem bzw. niedrigem Kalkulationszinssatz* und *Ökomodernisierungsstrategie* den Strategien *Substanzerhaltungsstrategie Basis* bzw. *Erweitert, langfristige Modernisierungsstrategie* und *Ökomodernisierungsstrategie* zugeordnet wurden. Tabelle 62 fasst die Zuordnungswahrscheinlichkeiten zusammen.

Bei den Vermietern stehen aufgrund der Struktur des Mikrozensus 2006 nur Informationen zu Gebäuden, Wohnungen und Mietern zur Verfügung, auf Basis derer Rückschlüsse auf das Sanierungsverhalten der Vermieter gezogen werden müssen. Nach Stengel u. a. (2012) liegen den Zuordnungswahrscheinlichkeiten die folgenden Annahmen zugrunde:

- Ökomodernisierungen sind bei Vermietern im Vergleich zu selbstnutzenden Eigentümern seltener anzutreffen.
- Mit zunehmender Einkommensklasse der Mieter steigt die Möglichkeit, Mieterhöhungen zu tragen, und zudem wird unterstellt, dass diese eher in Wohngebieten angetroffen werden, in denen für modernisierte Wohnungen adäquate Mieten erzielt werden können.

- Mit steigenden warmen Nebenkosten steigt sowohl die Notwendigkeit von Sanierungen als auch die Akzeptanz von Mietsteigerungen bei gleichzeitiger Nebenkostenreduktion.
- Der Einfluss der Bruttokaltmiete wurde nicht berücksichtigt, da zuvor eine weitere Differenzierung hinsichtlich der Gemeindegößenklassen sinnvoll scheint.

Tabelle 62: Wahrscheinlichkeiten für die Zuordnung von Vermietern zu Entscheidungstypen im *Entscheidungsansatz Vermieter Stengel* (in Anlehnung an: Stengel u. a. 2012; Datengrundlage: Stengel u. a. 2012 bzw. Annahmen)

Bruttokaltmiete [€/m ²]	Haushaltsnettoeinkommen des Mieters [€/Monat]	Warme Nebenkosten [€/m ²]	Abbruchstrategie	Substanzerhaltungsstrategie Basis	Substanzerhaltungsstrategie Erweitert	Langfristige Modernisierungsstrategie	Ökomodernisierungsstrategie
<4,9	<1.500	<0,8	75%	25%	0%	0%	0%
		0,8-1,5	50%	50%	0%	0%	0%
		>1,5	25%	75%	0%	0%	0%
	1.500-3.200	<0,8	50%	25%	25%	0%	0%
		0,8-1,5	33%	33%	33%	0%	0%
		>1,5	0%	33%	50%	0%	17%
	>3.200	<0,8	0%	25%	75%	0%	0%
		0,8-1,5	0%	0%	92%	0%	8%
		>1,5	0%	0%	83%	0%	17%
4,9-7	<1.500	<0,8	75%	25%	0%	0%	0%
		0,8-1,5	50%	50%	0%	0%	0%
		>1,5	25%	75%	0%	0%	0%
	1.500-3.200	<0,8	50%	25%	25%	0%	0%
		0,8-1,5	33%	33%	33%	0%	0%
		>1,5	0%	33%	50%	0%	17%
	>3.200	<0,8	0%	25%	75%	0%	0%
		0,8-1,5	0%	0%	92%	0%	8%
		>1,5	0%	0%	83%	0%	17%
>7	<1.500	<0,8	75%	25%	0%	0%	0%
		0,8-1,5	50%	50%	0%	0%	0%
		>1,5	25%	75%	0%	0%	0%
	1.500-3.200	<0,8	50%	25%	25%	0%	0%
		0,8-1,5	33%	33%	33%	0%	0%
		>1,5	0%	33%	50%	0%	17%
	>3.200	<0,8	0%	25%	75%	0%	0%
		0,8-1,5	0%	0%	92%	0%	8%
		>1,5	0%	0%	83%	0%	17%

5.4.4.6 Empirisch fundierte Entscheidungsansätze (Modell A und B)

Die Sanierungsentscheidung kann wegen der Datenlage nur im Falle rein selbstnutzender Eigentümer mittels empirisch fundierter Sanierungsentscheidungsmodelle bzw. Entscheidungsansätze simuliert werden (vgl. Kapitel 3).

Dabei werden die bereits in der Literatur kalibrierten Sanierungsentscheidungsmodelle A (vgl. Grösche u. a. 2009) und B (vgl. Achtnicht 2011) eingesetzt (vgl. Tabelle 43 auf S. 189 sowie folgende Ausführungen). Modell B kann für alle drei Anwendungsfälle – Anlagentechnikwechsel, Gebäudehüllensanierung und Kombination aus Anlagentechnikwechsel und Gebäudehüllensanierung – angewendet werden. Modell A kann hingegen nur für Anlagentechnikwechsel bzw. Gebäudehüllensanierung, aber nicht für die Kombination verwendet werden. Für die Simulation der ausschöpfbaren Potenziale mittels Modell A und B bei rein selbstgenutzten Gebäuden werden, wie in Tabelle 63 dargestellt, die Entscheidungsansätze *Detail* und *Konsistenz* unterschieden. Beim Entscheidungsansatz *Detail* wird, sofern möglich, für jeden Anwendungsfall das Modell B verwendet. Dieses Modell weist einen höheren Detaillierungsgrad auf, ist allerdings nicht bei gleichzeitiger Entscheidung hinsichtlich Anlagentechnikwechsel und Gebäudehüllensanierung anwendbar. Daher wird zusätzlich der Entscheidungsansatz *Konsistenz* betrachtet, bei dem Modell A durchgängig, d. h. für alle Anwendungsfälle, angewendet wird.

Tabelle 63: Empirisch fundierte Entscheidungsansätze mittels Modell A und B bei rein selbstnutzenden Eigentümern

Entscheidungsansatz	Anlagentechnikwechsel	Gebäudehüllensanierung	Anlagentechnikwechsel und Gebäudehüllensanierung
Detail	Achtnicht (2011)	Achtnicht (2011)	Grösche u. a. (2009)
Konsistenz	Grösche u. a. (2009)	Grösche u. a. (2009)	Grösche u. a. (2009)

Die Gewichtungen $w_{a,g}$ für Modell A sind Tabelle 64 zu entnehmen. Diese hängen vom Umfang des Maßnahmenpakets, der durch die Variable $r_{h,v}$ codiert wird, ab.

$$r_{h,v} = 1000 * |\{ho_h\} \cap \{ho_{h_g}\}| + 100 * |\{hf_h\} \cap \{hf_{h_g}\}| + 10 * |\{hw_h\} \cap \{hw_{h_g}\}| + (1 - |\{v\} \cap \{v_g\}|) \quad (5.76)$$

Für Maßnahmenpakete mit und ohne energetische Verbesserung des unteren Gebäudeabschlusses sowie für Vollsanierungen mit und ohne Fenster werden dieselben Gewichtungen angesetzt.

Die Gewichtungen $w_{a,g}$ für Modell B sind Tabelle 65 zu entnehmen.

Tabelle 64: Gewichtungen für Modell A für die Maßnahmen oberer Gebäudeabschluss (1000), Fenster (0100), Wand (0010), und Wärmeversorgungspaket (0001), Maßnahmenpakete sowie keine Sanierung (Datengrundlage: Grösche u. a. 2009)

$r_{n,p}$	$w_{a,g}$					
	$w_{Investition}$	$w_{Primärenergiebedarfseinsparung}$	$w_{Verfügbares Einkommen,g}$	$w_{Informationszugriff}$	$w_{Energieverbrauch}$	$w_{Hilfsindikator}$
0000	-0,109	0,193	0,004	-0,028	0,017	2,246
1000			0,009	-0,003	0,005	-0,094
0100			-0,009	-0,025	0,036	-0,039
0010			0,021	-0,046	0,012	-1,803
0001			0,005	-0,031	0,029	0,588
1100			-0,013	-0,017	0,011	0,614
1010			0,011	-0,010	-0,034	-1,668
1001			0,014	-0,015	0,026	-1,003
1110			0,001	-0,017	0,019	-1,883
1101			0,001	-0,017	0,019	0,482
1011			0,001	-0,017	0,019	-2,663
0110			-0,023	-0,053	0,013	-0,354
0101			0,001	-0,017	0,019	0,731
0111			0,001	-0,017	0,019	-0,889
0011			0,001	-0,017	0,019	-1,956
1111			0,001	-0,017	0,019	-2,663

Tabelle 65: Gewichtungen $w_{a,g}$ für Modell B (Datengrundlage: Achtnicht 2011)

Indikator bzw. Attribut a	$w_{a,g}$
Investition (abzüglich Zuschuss)	-0,0401
Investition (abzüglich Zuschuss) in Ostdeutschland	-0,0257
Energieeinsparpotenzial	0,000494
Amortisationszeit	-0,0186
CO ₂ -Einsparung und Anlagentechnikwechsel	0,00668
CO ₂ -Einsparung und Hüllensanierung	0,00213
Empfehlung von Energieberater	0,201
Förderung	0,153
Garantiejahre	0,0217
Nur Anlagentechnikwechsel	-0,380
Anlagentechnikneinbau nach 2000 und Anlagentechnikwechsel	-0,288
Jünger als 46 Jahre und Anlagentechnikwechsel	0,276
Hoher Bildungsabschluss und Anlagentechnikwechsel	-0,251
Hat Pelletkessel und Anlagentechnikwechsel	-0,269
Energiepreisanstiegserwartung und Anlagentechnikwechsel	0,197
Kein Bedarf an einer Verbesserung der Gebäudehülle und Anlagentechnikwechsel	0,580

5.4.4.7 Normierung der Attribute

Um die auf Potenzialakturstypen, Entscheidertypen und -strategien basierenden Sanierungsentscheidungsmodelle und Entscheidungsansätze bei einem Einzelgebäude anzuwenden, sollen die Attributwerte i_a jedes Attributs a

durch die Funktionen $v_{a,g}$ auf das Intervall $[0,1]$ normiert werden (vgl. Merz 2011; Nardo u. a. 2005). Neben den Gewichtungsfaktoren hat insbesondere die Normierungsfunktion einen maßgeblichen Einfluss auf den Nutzwert und damit die Sanierungsentscheidung. Daher sollten die Normierungsfunktionen auf die Potenzialakteurstypen sowie die Entscheidungstypen und -strategien abgestimmt sein. Diese Funktionen haben, wie auch die Gewichtungen, einen subjektiven Charakter und dienen der flexiblen und interpretierbaren Definition von Szenarien. Entscheidend für die Definition der Normierungsfunktion ist der Wertebereich der Attribute. Daher wurden zunächst für ein exemplarisches Wohngebäude mit einer Wohneinheit die Attributwerte analysiert und darauf aufbauend die Normierungsfunktionen für jedes Attribut definiert.

Tabelle 66: Lage- und Streuungsparameter der Attributwerte eines exemplarischen Einfamilienhauses

Hierarchisch angeordneter Satz von Indikatoren				Lageparameter					Streuungspar.	
Ebene 1	Ebene 2	Ebene 3	Einheit	Min	25%-Quantil	Mittelwert	75%-Quantil	Max	Standardabweichung	Variationskoeffizient
	Wirtschaftlichkeit	Kurzfristige Sichtweise	Investition	€	3.362	16.558	24.545	28.325	50.619	11.200
Mittelfristige Sichtweise		Amortisationszeit aus Selbstnutzersicht	a	10	16	23	29	99	11	46%
		Amortisationszeit aus Vermietersicht	a	9,7	10,3	11,7	12,0	99,0	3,4	29%
Voraus-schauende Sichtweise		Energiekosten	€/ (m ² a)	3	4	6	8	14	2	37%
		Interner Zinsfuß aus Selbstnutzersicht	-	-323%	-5%	4%	7%	100	181%	4513%
		Interner Zinsfuß aus Vermietersicht	-	-209%	7%	7%	8%	9%	5%	67%
		Kapitalwert aus Selbstnutzersicht	€	-28.053	-10.415	-3.988	2.562	9.513	9.484	-238%
		Kapitalwert aus Vermietersicht	€	-4.580	2.578	6.172	8.365	18.626	5.352	87%
		Barwert aus Mietersicht	€	-61.571	23.526	19.230	-6.607	4.378	18.980	-99%
		Annuität aus Selbstnutzersicht	€/a	-2.251	-836	-320	206	763	761	-238%
		Annuität aus Vermietersicht	€/a	-368	207	495	671	1.495	429	87%
Annuität aus Mietersicht		€/a	-4.941	-1.888	-1.543	-530	351	1.523	-99%	
Energiepreisrisiko		Energiekosten/investitionsabh. Kosten	€/€	13%	41%	87%	105%	958%	78%	90%
Leerstandsrisiko	Endenergiebedarf/durchschnittlicher nationaler Endenergiebedarf	(kWh/(m ² a))/ (kWh/(m ² a))	28%	40%	59%	75%	128%	21%	36%	

5 Entwicklung des aktorsbasierten Wohngebäude- und Haushaltsmodells

Hierarchisch angeordneter Satz von Indikatoren				Lageparameter					Streuungspar.	
Ebene 1	Ebene 2	Ebene 3	Einheit	Min	25%-Quantil	Mittelwert	75%-Quantil	Max	Standardabweichung	Variationskoeffizient
Energiebedarf	Endenergiebedarf		kWh/(m ² a)	50	71	105	133	226	37	36%
	Anteil erneuerbarer Energien an Endenergie		kWh/kWh	0%	1%	27%	30%	100%	42%	157%
	Nicht erneuerbarer Primärenergiebedarf		kWh/(m ² a)	3	51	105	156	308	72	68%
	Primärenergiebedarf		kWh/(m ² a)	59	92	134	167	308	49	37%
Klimaschutz	CO ₂ -Emissionen		kg/(m ² a)	9	18	27	34	83	12	46%
	CH ₄ -Emissionen		g/(m ² a)	0	0	1	1	9	1	192%
	PM-Emissionen		g/(m ² a)	0	0	2	1	19	3	198%
Luftreinhaltung	NO _x -Emissionen		g/(m ² a)	1	7	15	20	66	12	79%
	SO ₂ -Emissionen		g/(m ² a)	0	0	6	6	49	10	164%
	NMVOE-Emissionen		g/(m ² a)	0	0	1	1	2	0	78%
Innenraumkomfort	Dämmqualität		-	0%	44%	56%	69%	100%	18%	33%
	Dämmtiefe		-	0%	50%	75%	100%	100%	22%	29%
Unabh.	Unabhängigkeit		-	0%	4%	31%	45%	69%	25%	82%
Soziale Auswirkungen	Verfügbares Einkommen der Bewohner nach Wohnen		€/Monat	4.186	4.233	4.277	4.320	4.438	63	1%
Innovationsgrad der Techn.	Marktanteil		-	0%	1%	2%	4%	9%	2%	73%
	Prestige der Technologie		-	33%	34%	43%	45%	69%	14%	33%
Gebäudeästhetik	Störende Optik		-	0%	25%	46%	69%	100%	24%	52%
Finanzierung	Investition/Verfügbares Einkommen der Bewohner		€/(Monat)	0,8	3,9	5,8	6,7	11,9	2,6	46%
Marktanteil der Technologie	Deutschland		-	0%	1%	2%	4%	9%	2%	73%
	Bundesland		-	0%	1%	3%	4%	12%	2%	73%
	Bundesland – GGK		-	0%	1%	3%	5%	14%	2%	75%
Abstand von vorheriger Technik	Verrohrungswechsel		-	0%	0%	0%	0%	0%	0%	-
	Energieträgerwechsel		-	0%	0%	63%	100%	100%	48%	77%
Illegalität	"Illegale" Variante		-	0%	0%	25%	50%	100%	22%	86%

Das betrachtete Einfamilienhaus¹ hat eine Gesamtfläche von 140 m² und wird vor der Sanierung zentral (Raumwärme und Warmwasser) mit Heizöl beheizt. Es stehen die Sanierung der Gebäudehülle und der Austausch der Anlagentechnik an, wobei 6.144 Sanierungsvarianten gewählt werden können. Im Falle einer Sanierung von Bauteilen der Gebäudehülle wurden nur Bauteile betrachtet, welche die Mindestanforderungen nach EnEV 2009 (mindestens) erfüllen. Zu jeder Variante wurden die Attribute berechnet. Lage- und Streuungsparameter zu den Attributwertverteilungen sind Tabelle 66 zu entnehmen.

Die zur Dimension *Wirtschaftlichkeit* gehörenden Investitionen reichen von 3.362 bis 50.619 € bei einem Mittelwert von 24.545 € und einer Standardab-

weichung von 11.200 €. Daraus ergibt sich ein Variationskoeffizient¹¹⁶ von 46%. Aus Selbstnutzersicht ergibt sich für die Amortisationszeit bei einem Mittelwert von 23 Jahren ein Variationskoeffizient von 46%, wobei Kapitalwert und interner Zinsfuß bei Mittelwerten von 4% bzw. -3.988 € Variationskoeffizienten mit Beträgen von über 100% aufweisen. Aus Vermietersicht ergeben sich unter der Annahme der Umlage von 11% der umlagefähigen Investitionen im Mittel Amortisationszeiten von 11,7 Jahren und ein interner Zinsfuß von 7%. Der zugehörige Kapitalwert hat bei einem Mittelwert von 6.172 € einen Variationskoeffizienten von 87%. Aus Mietersicht ergibt sich ein negativer Barwertmittelwert von -19.230 €. Im Mittel führt eine Mieterhöhung der Jahreskaltmiete um 11% der umlagefähigen Investition zu einer finanziellen Schlechterstellung der Mieter mit einer Annuität von -1.543 € pro Jahr. Doch existieren selbst bei einer Umlage von 11% Sanierungsvarianten, die sowohl Vermieter als auch Mieter besserstellen. Die jährlichen Energiekosten für Raumwärme und Warmwasser reichen von 3 bis 14 €/m² a) und das Verhältnis von Energiekosten zu investitionsabhängigen Kosten – und damit ein Maß für das Energiepreisrisiko – von 13% bis 958%. Im Vergleich zum durchschnittlichen nationalen Endenergiebedarf bewegt sich der Endenergiebedarf des Gebäudes zwischen 28% und 128%. Insgesamt zeigen die Attribute der Dimension *Wirtschaftlichkeit*, dass zahlreiche wirtschaftliche Sanierungsvarianten mit unterschiedlichem Investitionsbedarf existieren. Die Wirtschaftlichkeit hängt dabei stark von der Sichtweise ab.

Der zur Dimension *Umwelt* gehörende Endenergiebedarf schwankt zwischen 50 und 226 kWh/(m² a) und der Primärenergiebedarf zwischen 59 und 308 kWh/(m² a). Im Mittel werden 27% des Endenergiebedarfs durch erneuerbare Energien gedeckt, was zu einem nicht erneuerbaren Primärenergiebedarf von 3 bis 308 kWh/(m² a) führt. Die CO₂-Emissionen reichen von 9 bis 83 kg/(m² a) bei einem Variationskoeffizienten von 46%. Die Variationskoeffi-

¹¹⁶ Der empirische Variationskoeffizient ergibt sich als Verhältnis von empirischer Standardabweichung und arithmetischem Mittelwert (Kesel u. a. 1999).

zienten der Emissionen an NO_x und NMVOC sind mit 79% bzw. 78% höher, diejenigen der Emissionen an CH_4 , PM und SO_2 mit 164-198% deutlich höher. Insgesamt zeigt sich, dass insbesondere bei den Luftschadstoffemissionen und den CH_4 -Emissionen stärkere Variationen auftreten als bei den Attributen der Dimension *Wirtschaftlichkeit*¹¹⁷ und den übrigen Attributen der Dimension *Umwelt*. Dabei wird auch die Größenordnung der (technischen) Emissionsminderungspotenziale sichtbar.

Die zur Dimension *Sonstiges* gehörende Schwankungsbreite von Dämmqualität, Dämmtiefe und störender Optik reicht definitionsbedingt von 0% bis 100%, diejenige der Unabhängigkeit und des Prestiges der Technologie bis 69%. Das verfügbare Einkommen der Selbstnutzer reicht von 4.186 bis 4.438 €/Monat. Der Marktanteil der Technologien in Deutschland liegt bei maximal 9% und im Mittel bei 2%. Die Werte in Bundesland und Bundesland-Gemeindegrößenklassen-Kombination weichen davon leicht ab.

Die zur Dimension *Hemmnisse* gehörenden Investitionen entsprechen 0,8 bis 11,9 Haushaltsmonatseinkommen. Ein Verrohrungswechsel war im betrachteten Falle nicht notwendig. Im Mittel sind 63% der Sanierungsvarianten mit einem Energieträgerwechsel verbunden. Die „Illegalität“ der Varianten reicht wiederum definitionsgemäß von 0% bis 100%.

An die Normierungsfunktionen werden folgende Anforderungen gestellt:

- *Interattributabstimmung*: Gehen mehrere Attribute in die Sanierungsentscheidung ein, so sollen die Normierungsfunktionen der Attribute aufeinander abgestimmt sein.
- *Strenge Monotonie*: Geht nur ein Attribut in die Sanierungsentscheidung ein, so soll die Sanierungsvariante mit dem höchsten bzw. niedrigsten Attributwert gewählt werden. Dies ist bspw. relevant für den Potenzialakteurstyp *Min NO_x*, mit dem die technischen Minderungs-

¹¹⁷ Ausnahmen sind der interne Zinsfuß, der Kapitalwert und die Annuität aus Selbstnutzersicht.

tenziale für NO_x-Emissionen bestimmt werden sollen. Diese Anforderung wird durch jede streng monotone Funktion erfüllt.

- *Intraattributabstimmung*: Dieselben absoluten Attributwertdifferenzen – bspw. eine Investitionsdifferenz von 1.000 € – sollen die Sanierungsentscheidung bei niedrigen relativen Attributwertabweichungen – bspw. 1.000-2.000 € – mindestens so stark beeinflussen wie bei hohen – bspw. 40.000-41.000 €. Diese Anforderung ist bei konkaven streng monoton steigenden und bei konvexen streng monoton fallenden Normierungsfunktionen erfüllt.
- *Transparenz*: Die Normierungsfunktionen sollen transparent und leicht verständlich sein.

Die Anforderung *Interattributabstimmung* kann durch die exogene Vorgabe von aufeinander abgestimmten oberen und unteren Normierungsgrenzen \bar{i}_a und \underline{i}_a erfüllt werden. Für diese gelte

$$\begin{aligned} v_{a,g}(\underline{i}_a) &= \begin{cases} 0; & \forall a \in A_+ \\ 1; & \forall a \in A_- \end{cases} \\ v_{a,g}(\bar{i}_a) &= \begin{cases} 1; & \forall a \in A_+ \\ 0; & \forall a \in A_- \end{cases} \end{aligned} \quad (5.77)$$

Die verwendeten Normierungsgrenzen sind in Tabelle 67 angegeben. Dabei wird auch spezifiziert, welche Normierungsgrenzen mit der Anzahl der Wohneinheiten zu multiplizieren sind und welche Attribute zu A_+ bzw. A_- gehören. Bei der Wahl der Normierungsgrenzen wurde darauf geachtet, dass möglichst der gesamte Teil des Wertebereichs abgedeckt ist, der den Attributwerten mit dem höchsten Teilnutzen entspricht. In manchen Fällen, bspw. beim internen Zinsfuß, wurde darauf verzichtet, da Ausreißer auftreten. Somit ist die Anforderung der *strengen Monotonie* nur teilweise erfüllt.

5 Entwicklung des aktorsbasierten Wohngebäude- und Haushaltsmodells

Tabelle 67: Exogen vorgegebene Normierungsgrenzen für die Attribute der Sanierungsentscheidungsmodelle (Datengrundlage: Annahmen)

Hierarchisch angeordneter Satz von Indikatoren				Gebäude mit 1 WE		Gebäude mit mehreren WE	Großer Wert entspricht großem Nutzen
Ebene 1	Ebene 2	Ebene 3	Einheit	Untere Normierungsgrenzen	Obere Normierungsgrenzen	Multiplikation der Normierungsgrenzen mit WE	
Wirtschaftlichkeit	Kurzfristige Sichtweise	Investition	€	0	60.000	1	0
	Mittlere Sichtweise	Amortisationszeit aus Selbstnutzertsicht	a	0	30	0	0
		Amortisationszeit aus Vermietersicht	a	0	30	0	0
		Energiekosten	€/ (m ² a)	0	30	0	0
	Vorausschauende Sichtweise	Interner Zinsfuß aus Selbstnutzertsicht	%	-30	30	0	1
		Interner Zinsfuß aus Vermietersicht	%	-30	30	0	1
		Kapitalwert aus Selbstnutzertsicht	€	-60.000	60.000	1	1
		Kapitalwert aus Vermieters.	€	-60.000	60.000	1	1
		Barwert aus Mietersicht	€	-60.000	60.000	1	1
		Annuität aus Selbstnutzertsicht	€/a	-6.000	6.000	1	1
		Annuität aus Vermietersicht	€/a	-6.000	6.000	1	1
		Annuität aus Mietersicht	€/a	-6.000	6.000	1	1
	Energiepreiskrisiko	Energiekosten/ investitionsabh. Kosten	€/€	0	30	0	0
	Leerstandsrisiko	Endenergiebedarf/durchschnittlicher nationaler Endenergiebedarf	(kWh/(m ² a))/ (kWh/(m ² a))	0	3	0	0
	Umwelt	Energiebedarf	Endenergiebedarf	kWh/(m ² a)	0	400	0
Anteil erneuerbarer Energien an Endenergie			kWh/kWh	0	1	0	1
Nicht erneuerbarer Primärenergiebedarf			kWh/(m ² a)	0	600	0	0
Primärenergiebedarf			kWh/(m ² a)	0	600	0	0
Klimaschutz		CO ₂ -Emissionen	kg/(m ² a)	0	200	0	0
		CH ₄ -Emissionen	g/(m ² a)	0	200	0	0
Luftreinhaltung		PM-Emissionen	g/(m ² a)	0	200	0	0
		NO _x -Emissionen	g/(m ² a)	0	200	0	0
		SO ₂ -Emissionen	g/(m ² a)	0	200	0	0
		NMVOE-Emissionen	g/(m ² a)	0	200	0	0
Sonstiges	Innenraumkomfort	Dämmqualität	-	0	1	0	1
		Dämmtiefe	-	0	1	0	1
	Unabh.	Unabhängigkeit	-	0	1	0	1
	Soziale Auswirkungen	Verfügbares Einkommen der Bewohner nach Wohnen	€/Monat	0	10.000	0	1
	Innovationsgrad der Techn.	Marktanteil	-	0	1	0	0
	Gebäudeästhetik	Prestige der Technologie	-	0	1	0	1
Hemmnisse	Finanzierung	Störende Optik	-	0	1	0	0
		Investition/Verfügbares Einkommen der Bewohner	€/ (€/Monat)	0	60	0	0
	Marktanteil der Technologie	Deutschland	-	0	1	0	1
		Bundesland	-	0	1	0	1
		Bundesland – G GK	-	0	1	0	1
	Abstand von vorh. Technik	Verrohrungswechsel	-	0	1	0	0
		Energieträgerwechsel	-	0	1	0	0
Illegalität	"Illegale" Variante	-	0	1	0	0	

Diese Grenzen werden in *AWOHM* nicht für jedes Gebäude individuell vorgegeben, sondern pauschal für alle Gebäude einer bestimmten Größe. Bei Attributen, die näherungsweise proportional zur Gebäudegröße sind, werden die Normierungsgrenzen proportional zur Anzahl der Wohneinheiten verändert. Eine Alternative ist die Zuordnung der Teilnutzenwerte 0 und 1 zu den jeweils höchsten bzw. niedrigsten Attributwerten aller erreichbaren Sanierungsvarianten eines individuellen Gebäudes (vgl. Bertsch 2008; Merz 2011). Der Nachteil wäre dabei, dass bei Gebäuden, bei denen alle erreichbaren Sanierungsvarianten bei gewissen Attributen nur leichte Schwankungen aufweisen, derartige Attribute einen starken Einfluss auf die Sanierungsentscheidung hätten. Daher werden Normierungsgrenzen exogen vorgegeben.

Ein weiterer Vorteil der pauschalen Festlegung der (teilweise hochskalierten) Normierungsgrenzen auf Basis der Indikatorwertebereiche eines exemplarischen Gebäudes - kombiniert mit Erfahrungen bez. "typischer" Indikatorwertebereiche - ist die Transparenz und die leichte Verständlichkeit. Eine Analyse der Wertebereiche für alle in *AWOHM* abgebildeten Gebäude und eine darauf basierende Typisierung von Gebäuden hinsichtlich adäquater Normierungsgrenzen wäre eine mögliche Weiterentwicklung. Da die Auswirkung der Indikatornormierung auf die Sanierungsentscheidung jedoch im Zusammenspiel mit der (annahmenbasierten) Indikatorgewichtung (vgl. vorige Abschnitte) interpretiert werden muss, erscheint für diese Arbeit ein höherer Differenzierungsgrad bez. der Normierungsgrenzen nicht zweckmäßig.

Bei linearer Interpolation zwischen den Normierungsgrenzen ist die Anforderung der *Intraattributsabstimmung* erfüllt, wobei die Normierungsfunktion dann nur konkav bzw. konvex und nicht streng konkav bzw. streng konvex ist. Dadurch, dass die Normierungsgrenzen bspw. beim internen Zinsfuß nicht den gesamten Attributwertebereich abdecken, ist die Funktion zwar monoton, aber in den Randbereichen nicht streng monoton, sodass die Anforderung nach *strenger Monotonie* nicht für alle Attribute erfüllt ist. Die lineare Interpolation zwischen den Normierungsgrenzen ist ein einfacher und leicht nachvollzieh-

barer Ansatz, der der Anforderung *Transparenz* gerecht wird. Nicht-lineare Ansätze oder stückweise lineare Ansätze können Vorteile bei den Anforderungen *Intraattributsabstimmung* und *strenge Monotonie* haben, sind allerdings komplexer und daher weniger leicht verständlich. Daher wird hier die lineare Interpolation zwischen den Normierungsgrenzen verwendet. Für die Normierungsfunktion $v_{a,g}(i_{a,g}(h, v))$ gelte daher

$$v_{a,g}(i_{a,g}(h, v)) = \begin{cases} \max\left(0, \min\left(\frac{i_{a,g}(h,v)-\underline{i}_a}{\bar{i}_a-\underline{i}_a}, 1\right)\right) & \forall a \in A_+ \\ \max\left(0, \min\left(\frac{\bar{i}_a-i_{a,g}(h,v)}{\bar{i}_a-\underline{i}_a}, 1\right)\right) & \forall a \in A_- \end{cases} \quad (5.78)$$

5.4.5 Abbruch

Der Abbruch¹¹⁸ von Gebäuden ist in *AWOHM* beschränkt auf leerstehende Gebäude bestimmter Gebäudegruppen. Von diesen wird jährlich ein exogen vorgegebener Anteil AR [-] abgebrochen. Einige Gebäudegruppen, wie historische Bauten sowie kürzlich errichtete Gebäude, werden per Annahme vom Abbruch ausgeschlossen. Daher können in *AWOHM* nur Gebäude abgebrochen werden, die nach 1918 gebaut wurden und mindestens 30 Jahre alt sind.

Für jeden Bewohner b wird das Attribut *Anteil des Leerstands am Hochrechnungsfaktor* ALH_b zum Zeitpunkt t herangezogen, um den Abbruch und damit den Leerstand zum Zeitpunkt $t + 1$ zu bestimmen.

$$ALH_b(t + 1) = \frac{ALH_b(t) - AR * ALH_b(t)}{(1 - AR * ALH_b(t))} \quad (5.79)$$

Der *Hochrechnungsfaktor* HRF_b muss ebenfalls angepasst werden.

$$HRF_b(t + 1) = HRF_b(t) * (1 - AR * ALH_b(t)) \quad (5.80)$$

Mittlere jährliche Abbruchraten der letzten Jahre sind 0,043% [m^2/m^2] des Gesamtbestands in den alten Bundesländern (eigene Berechnung; Datengrundlage: Statistisches Bundesamt 2006-2010). In den neuen Bundesländern wurden jährlich 0,037% der RH und EFH sowie 0,26% der übrigen Gebäude-

¹¹⁸ Vgl. Fußnote 26 bez. des Begriffs Abbruch.

typen (überwiegend Sonderbauten) abgebrochen (eigene Berechnung; Datengrundlage: Statistisches Bundesamt 2006-2010). *AR* wird derart gewählt, dass für die Jahre 2006-2010 die historischen Abrissraten näherungsweise getroffen werden.

5.4.6 Neubau

Beim Neubau werden in *AWOHM* für jede Bundesland-Gemeindegrößen-Kombination jährlich *Einzelgebäude* erzeugt, die den in Abschnitt 5.3.5 eingeführten Gebäudetypen RH_K, EFH_K und MFH_K (Baualtersklasse 2007-2030) entsprechen. Zu jedem Gebäudetyp werden mehrere Einzelgebäude mit unterschiedlichen Ausgestaltungen hinsichtlich des *Wärmeversorgungspakets* erzeugt. Die *Hüllenpakete* der *Einzelgebäude* entsprechen den Mindestanforderungen, die in Szenarien über umweltpolitische Instrumente exogen vorgegeben werden. Als *Eigentumsverhältnis bez. der Wohnung* wird bei RH und EFH von selbstnutzenden Eigentümern und bei MFH von selbstnutzenden Eigentümergemeinschaften¹¹⁹ ausgegangen. Zu den *Einzelgebäuden* werden *Wohnungen* und jeweils ein fiktiver *Bewohner* erzeugt. Die Anzahl der jeweiligen Gebäude wird auf Basis exogener Daten bestimmt und über die Hochrechnungsfaktoren der fiktiven *Bewohner* berücksichtigt. Die *Bewohner* sind fiktiv, da alle Neubauten zunächst als leerstehend erzeugt werden, d. h. der *Anteil des Leerstands am Hochrechnungsfaktor* wird auf 100% gesetzt. In Abschnitt 5.5 wird beschrieben, wie die leerstehenden Einzelgebäude von umziehenden *Bewohnern* bezogen werden.

Einzelgebäude (vgl. Abschnitt 5.3.4)

Für jede Bundesland-Gemeindegrößenklassen-Kombination werden jährlich *Einzelgebäude* erzeugt, die sich hinsichtlich der energetischen Stammdaten, d. h. dem Gebäudetyp, der Eigentümerstruktur und dem Wärmeversorgungs-

¹¹⁹ Es wird angenommen, dass eine weitere Differenzierung der Eigentümerstruktur beim Neubau von untergeordneter Bedeutung für die Beantwortung der Forschungsfragen ist. Der Aufbau von *AWOHM* ermöglicht aber entsprechende Weiterentwicklungen.

paket unterscheiden. Als Gebäudetypen werden RH, EFH und MFH unterschieden. Bei RH und EFH wird als Eigentumsverhältnis bez. der Wohnung nur die Ausprägung Eigentümer des Gebäudes betrachtet, bei MFH nur Eigentümer der Wohnung. Bei den Wärmeversorgungspaketen werden fünf Varianten differenziert. Insgesamt werden damit je Bundesland-Gemeindegrößenklassen-Kombination jährlich 15 *Einzelgebäude* bzw. Instanzen der Klasse *Einzelgebäude* erzeugt, die jeweils mehrere Gebäude repräsentieren.

Für neu zu erzeugende *Einzelgebäude* sind demnach *Fremdschlüssel Bundesland*, *Fremdschlüssel Gemeindegrößenklasse* und *Fremdschlüssel Wärmeversorgungspaket* bekannt (vgl. Tabelle 18). Es wird angenommen, dass die *Einzelgebäude* hinsichtlich der energetischen Stammdaten und der *Anzahl der Wohneinheiten* sowie der *Fläche der Wohnungen im Gebäude* den eingeführten Gebäudetypen RH_K, EFH_K und MFH_K (Baualtersklasse 2007-2030) entsprechen (vgl. Abschnitt 5.3.5). Zu jedem Einzelgebäude wird ein separates *Hüllenpaket* erzeugt, sodass auch der entsprechende Fremdschlüssel bekannt ist. Das *Baujahr des Gebäudes* entspricht dem Jahr t der Simulation.

Wohnungen (vgl. Abschnitt 5.3.3)

Zu jedem Einzelgebäude werden entsprechend den bei den energetischen Stammdaten angegebenen Werten für Anzahl Wohneinheiten und Fläche der gesamten Wohnung Wohnungen erzeugt. Kaltmiete, kalte Nebenkosten und warme Nebenkosten werden nicht berücksichtigt, da von selbstgenutztem Wohneigentum ausgegangen wird (vgl. Fußnote 119 auf S. 235).

Bewohner (vgl. Abschnitt 5.3.2)

Zu jeder *Wohnung* wird ein fiktiver *Bewohner* erzeugt. *Fremdschlüssel Wohnung* und *Eigentumsverhältnisse bez. der Wohnung* sind bekannt. Die soziodemographischen Angaben werden beliebig initialisiert und der *Anteil des Leerstands am Hochrechnungsfaktor* wird auf 100% gesetzt. Der *Hochrechnungsfaktor* wird, wie im Folgenden beschrieben, basierend auf exogenen Neubauzahlen bestimmt.

Der jährliche Neubau an Wohneinheiten wird differenziert nach Kreisen und Gebäudegröße von 2006 bis 2020 exogen vorgegeben (BBSR 2006). Für die Jahre 2021 bis 2030 werden die Neubauzahlen von 2020 angesetzt. Bez. der Gebäudegröße werden Gebäude mit 1-2 WE (Ein- und Zweifamilienhäuser) sowie Gebäude mit mindestens 3 WE (Mehrfamilienhäuser) unterschieden. Anhand der Attribute *Anzahl Wohngebäude mit 1 WE*, *2 WE* und *mindestens 3 WE* sowie *Fremdschlüssel Kreis* auf Gemeindeebene (vgl. Tabelle 37) werden die neuzubauenden Wohneinheiten proportional zum Bestand auf die Gemeinden verteilt. Anschließend wird die Anzahl $NW_{1WE,ggk,pb,t}$, $NW_{2WE,ggk,pb,t}$ und $NW_{\geq 3WE,ggk,pb,t}$ der neuzubauenden Wohneinheiten für die Bundesland-Gemeindegrößenklassen-Kombinationen anhand der Attribute *Gemeindegrößenklasse* der Gemeinden und *Fremdschlüssel Bundesland* der Kreise bestimmt. Es wird angenommen, dass WE in Gebäuden mit 1-2 WE jeweils zu 50% in RH_K und EFH_K sowie WE in Gebäuden mit mindestens 3 WE in MFH_K sind. $NW_{1WE,ggk,pb,t}$, $NW_{2WE,ggk,pb,t}$ und $NW_{\geq 3WE,ggk,pb,t}$ umfassen dabei Wohneinheiten mit unterschiedlichen *Wärmeversorgungspaketen*. Der (1000-fache) *Hochrechnungsfaktor* HRF_b ergibt sich durch die Aufteilung dieser Wohneinheiten gemäß den Anteilen der ggf. korrigierten Anteile (vgl. Wärmeversorgungspakete, übernächster Absatz) der *Wärmeversorgungspakete* in Gebäuden der Baualtersklasse 2002-2006 differenziert nach Bundesland, Gemeindegrößenklasse und Gebäudetyp.

Hüllenpakete (vgl. Abschnitt 5.3.6)

Die je *Einzelgebäude* erzeugten *Hüllenpakete* richten sich nach den umweltpolitischen Instrumenten bzw. den gesetzlichen Mindestanforderungen. Die Einbaujahre der Bauteile entsprechen dem Baujahr des Gebäudes. Durch eine in den gesetzlichen Mindestanforderungen je Bauteil vorgegebene Qualitätsstufe werden die entsprechenden oberen und unteren Gebäudeabschlüsse, Fenster und Außenwände bestimmt und die entsprechenden Fremdschlüssel gesetzt. Es wird demnach davon ausgegangen, dass alle Gebäude nach den gesetzlichen Mindestanforderungen gebaut werden.

Wärmeversorgungspakete (vgl. Abschnitt 5.3.8)

Für die beim Neubau je *Einzelgebäude* erzeugten *Wärmeversorgungspakete* werden fünf Varianten unterschieden. Diese basieren jeweils auf den Hauptwärmeerzeugern Öl- und Gasbrennwertkessel, Holzpelletkessel, Fernwärmeversorgung sowie monovalenten elektrischen Wärmepumpen. Sofern Wahlmöglichkeiten existieren, wird die höhere Qualitätsstufe – bspw. Holzpelletkessel mit Partikelabscheider – eingesetzt. Die Hauptwärmeerzeuger werden mit zentraler Verrohrung für die Raumwärme- und die Warmwasserbereitstellung eingesetzt. Bei der Warmwasserbereitstellung werden sie durch solarthermische Röhrenkollektoren unterstützt, für die angenommen wird, dass sie 50% des Warmwasserbedarfs decken. Die Leistungsklassen werden gemäß dem Gebäudetyp ausgewählt. Die Energieträgerverfügbarkeit wird gemäß den Wärmeerzeugern zzgl. eines Elektrizitätsanschlusses gesetzt.

Der Wärmepumpenanteil wird exogen vorgegeben. Er lag bei dem den RH und EFH entsprechenden Gebäudetypen im Jahr 2006 bei 23%, wobei ein Anteil von 40% vom Bundesverband Wärmepumpe angestrebt wird (Bundesverband Wärmepumpe e.V. 2010). Daher wird der Anteil der Wärmepumpen im Neubau für RH und EFH für 2007 auf 23% gesetzt und steigt bis 2030 linear auf 40% an. Es wird angenommen, dass in MFH keine Wärmepumpen eingesetzt werden. Für den verbleibenden Anteil an Wärmeversorgungspaketen wird die Energieträgerverteilung der Baualtersklasse 2002-2006 herangezogen.

Investition

Die mit dem Neubau verbundenen Investitionen sollen für die Bewertung aus Staatssicht (vgl. Kapitel 6) quantifiziert werden. Bei den Neubauinvestitionen werden Investitionen für die Kostengruppen 300 (Bauwerk – Baukonstruktionen) und 420 (Wärmeversorgungsanlagen) nach DIN 276 (1993) berücksichtigt. Vom BKI (2010) werden drei Qualitätsstufen für Neubauten unterschieden: einfach, mittel und hoch. Dabei wird nicht nach Energieträgern und Wärmeerzeugertypen unterschieden, sondern ausschließlich nach der Gesamteffi-

zienz des Systems. Da die Neubauten als abgestimmte Einheit aus Gebäudehülle und Wärmeversorgungspaket betrachtet werden, richten sich in *AWOHM* die anzusetzenden Investitionen für die Wärmeversorgungspakete nach der Qualität der Gebäudehülle. Die wohnflächenspezifischen Investitionen, die für die Quantifizierung der Neubauinvestitionen herangezogen werden, sind in Tabelle 68 für die drei Gebäudetypen RH, EFH und MFH angegeben.

Tabelle 68: Wohnflächenspezifische¹²⁰ Neubauinvestitionen für die Kostengruppen 300 (Bauwerk – Baukonstruktionen) und 420 (Wärmeversorgungsanlagen) nach DIN 276 (1993) differenziert nach Gebäudetyp und Qualitätsstufe im Jahr 2008 (in Anlehnung an: Stengel u. a. 2012; Datengrundlage: BKI 2008)

Gebäudetyp	Wohnflächenspezifische Investitionen [€/m ²] (netto, Stand August 2008)					
	2007-2030a (einfache Qualität)		2007-2030b (mittlere Qualität)		2007-2030c (hohe Qualität)	
	Kostengruppe 300	Kostengruppe 420	Kostengruppe 300	Kostengruppe 420	Kostengruppe 300	Kostengruppe 420
RH	295	21	440	46	528	55
EFH	357	31	445	41	580	50
MFH	309	19	388	25	491	23

5.5 Dynamik des Haushaltsbestands

Der vorige Abschnitt 5.4 ging auf die Modellierung der vom Haushaltsbestand beeinflussten Dynamik des Wohngebäudebestands in *AWOHM* ein. Dieser Abschnitt beschreibt die Modellierung der vom Wohngebäudebestand beeinflussten Dynamik des Haushaltsbestands. Nach einer kurzen Übersicht wird in Abschnitt 5.5.1 auf die Haushaltsveränderung im engeren Sinne, in Abschnitt 5.5.2 auf den Wohnungsmarktwechsel und in Abschnitt 5.5.3 auf die Wohnungssuche eingegangen.

Die Integration von Bewohnern bzw. Haushalten in ein Wohngebäudemodell ermöglicht die Berücksichtigung von Investitionshemmnissen und finanziellen Belastungen sowie die Identifizierung sozio-demographischer und technischer Cluster mit, in Relation, großen Potenzialen aus umweltpolitischer Sicht (vgl. Kapitel 4). Neben den Wohngebäuden unterliegen allerdings auch die Haushalte bzw. die zugrundeliegenden Personen Veränderungen, was von Stengel u. a.

¹²⁰ Zur Umrechnung von der Bruttogrundfläche auf die Wohnfläche wurde ein Bruttogrundflächen-Wohnflächen-Verhältnis von 1,55 angesetzt (vgl. BewG 2013).

(2012) nur am Rande berücksichtigt wurde. Hohe Modernisierungsumlagen können Mieter belasten oder aber auch zum Auszug bewegen. Neubauten werden von derzeit in Bestandswohnungen lebenden Haushalten bezogen. Dadurch werden leerstehende Wohnungen hinterlassen, die wiederum von anderen Haushalten bezogen werden können. Außerdem werden Gebäude, deren Bewohner versterben, von nachfolgenden Haushalten bewohnt oder stehen leer. Da sich ein großer Teil der selbstgenutzten Einfamilienhäuser mit hohen Einsparpotenzialen im Eigentum von über 60- und 70-Jährigen befindet (vgl. Kapitel 4), ist die Berücksichtigung der Folgenutzung von sanierten und unsanierten Gebäuden von großem Interesse. Der in diesem Abschnitt beschriebene und in *AWOHM* umgesetzte Ansatz ermöglicht die konsistente Abbildung der beschriebenen Sachverhalte. Trotz zahlreicher Annahmen und Unsicherheiten können damit die Entwicklungen plausibler Wohngebäude- und Haushaltsentwicklungspfade mit ihren Auswirkungen analysiert und die umweltpolitischen Instrumente entsprechend angepasst werden. Zuletzt bietet der Ansatz vielfältige Erweiterungsmöglichkeiten.

Abbildung 14 setzt die einzelnen Elemente der Dynamik von Haushalts- und Wohnungsbestand in Beziehung. Differenziert werden regionale Wohnungsmärkte, die durch Bundesland-Gemeindegroßenklassen-Kombinationen definiert werden. In jedem dieser Wohnungsmärkte existieren zum Zeitpunkt t Wohnungen, die entweder leerstehen oder von Bewohnern (Haushalten) bewohnt werden. Diese Wohnungen verändern sich, wie in Abschnitt 5.4 beschrieben, durch Abbruch, Neubau sowie Sanierung und ergeben die Wohnungen zum Zeitpunkt $t + 1$. Neben den Wohnungen verändern sich auch die als Akteure modellierten Haushalte (Bewohner). Die Haushaltsveränderung im engeren Sinne umfasst einerseits die Veränderung der zum Haushalt gehörenden Personen und andererseits die Veränderung der Haushaltszusammensetzung. Dabei können bspw. durch den Auszug von Kindern oder Trennungen neue Haushalte entstehen oder durch Versterben des letzten Haushaltsmitglieds Haushalte im Modell eliminiert werden. Zudem können Haushalte durch

Umzug den Wohnungsmarkt wechseln. Nach der Haushaltsveränderung im engeren Sinne und einem etwaigen Wohnungsmarktwechsel ergeben sich die Haushalte zum Zeitpunkt $t + 1$, die auf den Bestand der Wohnungen zum Zeitpunkt $t + 1$ verteilt werden müssen bzw. um diese konkurrieren. Diese Verteilung, d. h. der Umzug und Einzug innerhalb eines Wohnungsmarktes, wird als Wohnungssuche modelliert. Dabei wird unterstellt, dass Haushalte nur auf ihrem (ggf. neuen) Wohnungsmarkt eine neue Wohnung suchen. Daraus ergibt sich die Beziehung zwischen Wohnungen und Haushalten (Bewohnern) zum Zeitpunkt $t + 1$.

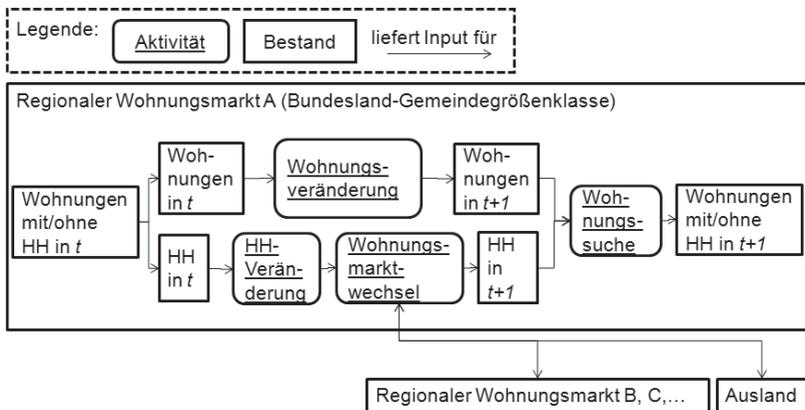


Abbildung 14: Haushalts- und Wohnungsveränderung, Wohnungsmarktwechsel und Wohnungssuche auf einem regionalen Wohnungsmarkt; HH: Haushalte

5.5.1 Haushaltsveränderung im engeren Sinne

Haushalte verändern sich durch die Veränderung der zum Haushalt gehörenden Personen und durch die Veränderung der Haushaltszusammensetzung. Abbildung 15 fasst die Modellierungsschritte der Haushaltsveränderung im engeren Sinne zusammen. Ausgehend von den Personen und den aus ihnen bestehenden Haushalten zum Zeitpunkt t durchlaufen die Personen personenbezogene Änderungen.

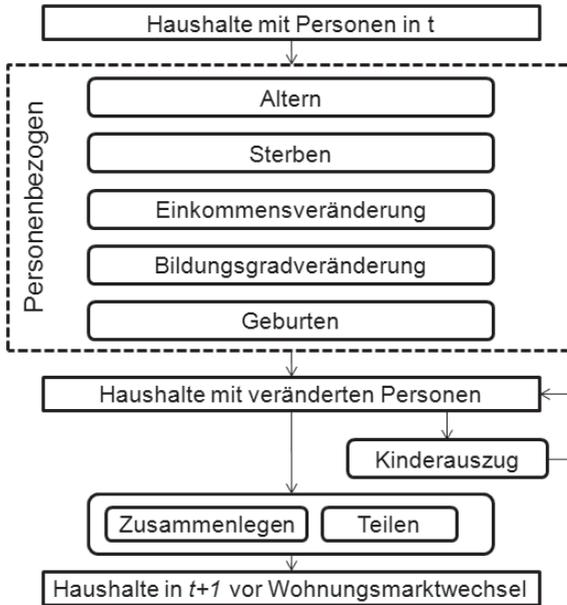


Abbildung 15: Modellierungsschritte der Haushaltsveränderung im engeren Sinne

Personen altern, sterben, verändern ihr Einkommen sowie ihren Bildungsgrad und werden geboren. Diese Veränderungen spiegeln sich direkt in den Haushaltseigenschaften wider. Bspw. verändern sich dadurch Alter, Bildungsgrad und ggf. Geschlecht des Haupteinkommensbeziehers, das Haushaltseinkommen und die Größe des Haushalts durch Geburt oder Tod. Daraus ergeben sich Haushalte mit veränderten Personen. Diese Haushalte verändern sich darüber hinaus durch den Auszug der Kinder sowie die sonstige Aufteilung und Zusammenlegung von Haushalten, bspw. wegen Trennungen, Scheidungen und Zusammenziehen mit dem Partner. Diese Änderungen beziehen sich überwiegend auf die Haushaltszusammensetzung, ergeben sich jedoch auch teilweise indirekt aus personenbezogenen Änderungen, bspw. beim Auszug der Kinder, einer Folge des Alterns der Kinder. Der Übergang zwischen personenbedingten und zusammensetzungsbedingten Veränderungen ist daher fließend.

Im Folgenden werden die einzelnen Modellierungsschritte der Haushaltsveränderung im engeren Sinne erläutert. Die Modellierungsebene des Bewohners b (Haushalt) entspricht dem Haupteinkommensbezieher des Haushalts zzgl. Eigenschaften des Haushalts. Daher erfolgt die Modellierung nicht für jede Person auf Mikroebene, sondern für den Haushalt bzw. Haupteinkommensbezieher (vgl. Abschnitt 5.3.2).

Altern

Jede Person altert jedes Jahr um ein Jahr. Dadurch erhöht sich das Alter AL_b des Haupteinkommensbeziehers eines Haushalts b vom Zeitpunkt t zum Zeitpunkt $t + 1$ um ein Jahr.

$$AL_b(t + 1) = AL_b(t) + 1 \quad (5.81)$$

Sterben

Jeder Person wird eine vom Alter AL abhängige Wahrscheinlichkeit PS_{AL} für das Versterben innerhalb des nächsten Jahres zugeordnet. Die verwendeten Werte sind Tabelle 69 zu entnehmen. Daraus wird näherungsweise die Wahrscheinlichkeit abgeleitet, dass sich die Haushaltsgröße HG_b durch den Tod eines Haushaltsmitglieds verringert. Die Veränderung $\Delta HG_b^{Sterben}$ der Größe des Haushalts b durch Sterben sei definiert durch:

$$\Delta HG_b^{Sterben}(t) = \begin{cases} 0 & \text{mit W.keit } (1 - \min(2, HG_b(t)) * PS_{AL_b(t)}) \\ -1 & \text{mit W.keit } (\min(2, HG_b(t)) * PS_{AL_b(t)}) \end{cases} \quad (5.82)$$

Dabei wird angenommen, dass bei Haushalten, die aus mindestens zwei Personen bestehen, die Wahrscheinlichkeit des Versterbens eines Haushaltmitglieds der doppelten Wahrscheinlichkeit des Versterbens des Haupteinkommensbeziehers entspricht. Dabei wird die Wahrscheinlichkeit des gleichzeitigen Versterbens mehrerer Haushaltmitglieder vernachlässigt. Zudem wird implizit angenommen, dass Haushalte mit mindestens zwei Mitgliedern auch mindestens zwei Personen im Alter des Haupteinkommensbeziehers umfassen und diese die Sterbewahrscheinlichkeit dominieren. Dies führt bspw. beim Zu-

sammenleben von Berufstätigen mit nicht mehr berufstätigen Eltern zur Unterschätzung der Sterbewahrscheinlichkeit. Zudem werden Altersunterschiede von Partnern und die Geschlechterabhängigkeit der Sterbewahrscheinlichkeit vernachlässigt.

Einpersonenhaushalte werden im Falle des Versterbens einer Person vollständig aus dem Modell eliminiert, indem der *Anteil des Leerstands am Hochrechnungsfaktor* ALH_b auf 100% gesetzt wird. Die Wohnung steht demnach leer. Falls ein Mitglied von Mehrpersonenhaushalten verstirbt, wird unterstellt, dass sich das Geschlecht des Haupteinkommensbeziehers mit einer Wahrscheinlichkeit von 50% ändert und sich das Haushaltsnettoeinkommen EK_b halbiert. Hierbei wird wiederum die Geschlechterabhängigkeit der Sterbewahrscheinlichkeit vernachlässigt.

Tabelle 69: Altersabhängige Sterbewahrscheinlichkeit im Jahr 2010 (Datengrundlage: Statistisches Bundesamt 2012c, Tabelle 3.3)

Alter AL		Wahrscheinlichkeit PS_{AL} , innerhalb des nächsten Jahres zu sterben
Von [Jahre]	Bis unter [Jahre]	
0	1	0,3%
1	30	0,0%
30	45	0,1%
45	50	0,2%
50	55	0,4%
55	60	0,6%
60	65	0,9%
65	70	1,4%
70	75	2,1%
75	80	3,7%
80	85	6,6%
85	90	12,1%
90	unbegrenzt	23,8%

Einkommensveränderung

Es wird angenommen, dass das Haushaltsnettoeinkommen EK_b bis zum mit 65 Jahren angesetzten Renteneintrittsalter RAL jährlich um den Anteil AEK ansteigt, beim Eintritt in die Rente auf den Anteil REK absinkt und anschließend wieder jährlich um den Anteil AEK ansteigt. Für AEK wird dabei 0,01 und für REK 0,5 angesetzt. Diese Parameter basieren auf Annahmen und können in Szenarien variiert werden.

$$EK_b(t+1) = \begin{cases} EK_b(t) * (1 + AEK) \text{ für } AL_b(t+1) < RAL \\ EK_b(t) * REK \text{ für } AL_b(t+1) = RAL \\ EK_b(t) * (1 + AEK) \text{ für } AL_b(t+1) > RAL \end{cases} \quad (5.83)$$

Bildungsgradveränderung

Die Veränderung des Bildungsgrades hat nur einen untergeordneten Einfluss auf die Modellergebnisse, sodass für den Bildungsgrad angenommen wird, dass sich dieser während des betrachteten Zeitraums nicht ändert.

$$BG_b(t+1) = BG_b(t) \quad (5.84)$$

Geburten

Jedem Haushalt wird in Abhängigkeit vom Alter AL_b des Haupteinkommensbeziehers und von der Haushaltsgröße HG_b eine Wahrscheinlichkeit PG_{AL_b, HG_b} zugeordnet, im nächsten Jahr ein Kind zu bekommen. Die Veränderung ΔHG_b^{Geburt} der Größe des Haushalts b durch Geburten sei definiert durch:

$$\Delta HG_b^{Geburt}(t) = \begin{cases} 1 \text{ mit W.keit } PG_{AL_b(t), HG_b(t)} \\ 0 \text{ mit W.keit } (1 - PG_{AL_b(t), HG_b(t)}) \end{cases} \quad (5.85)$$

Die Wahrscheinlichkeiten wurden auf Basis des SUF des Mikrozensus 2006 (vgl. Statistisches Bundesamt 2008c) bestimmt, indem differenziert nach Alter¹²¹ und Haushaltsgröße Haushalte, denen zum Zeitpunkt der Befragung ein Kind von unter einem Jahr angehörte, auf die Gesamtzahl der Haushalte mit deren Alter und deren Größe im vorhergehenden Jahr bezogen wurden. Haushaltsgröße und Alter wurden dabei jeweils um eine Einheit vermindert, um die in Tabelle 70 angegebenen Wahrscheinlichkeiten, im nächsten Jahr ein Kind zu bekommen, abzuleiten.

Die höchsten Wahrscheinlichkeiten treten mit 16% bis 18% bei einer Haushaltsgröße von 2 bis 3 Personen und einem Alter von 26 bis 35 Jahren auf. Es wird dabei unterstellt, dass der Haushalt, abgesehen von dem Kind, bereits vor der Geburt in dieser Konstellation bestand.

¹²¹ Alter des Haupteinkommensbeziehers und Alter des Haushalts werden als Synonyme verwendet.

Tabelle 70: Wahrscheinlichkeit für Haushalte, im nächsten Jahr ein Kind zu bekommen, differenziert nach Altersklasse des Haupteinkommensbeziehers und Haushaltsgröße (eigene Berechnung; Datengrundlage: Statistisches Bundesamt 2008c)

Haushaltsgröße [Personen]	Alter des Haupteinkommensbeziehers [Jahre]							
	≤20	21-25	26-30	31-35	36-40	41-45	46-50	>50
1	3%	2%	1%	1%	1%	0%	0%	0%
2	14%	9%	14%	16%	10%	3%	1%	0%
3	4%	11%	16%	18%	9%	4%	1%	0%
4	5%	10%	8%	7%	3%	2%	1%	0%
5	0%	4%	5%	5%	3%	2%	1%	0%
6	0%	5%	7%	11%	5%	2%	2%	1%
≥7	0%	0%	0%	15%	8%	6%	4%	6%

Kinderauszug

Beim Kinderauszug zieht ein zu einem Haushalt gehörendes Kind aus dem Haushalt aus. Dadurch verkleinert sich dieser Haushalt um eine Person und ein neuer Haushalt entsteht, der ggf. direkt mit anderen Haushalten zusammengesetzt wird. Da die Modellierung auf Haushaltsebene und nicht auf Personenebene erfolgt, wird das Alter der Kinder nicht explizit modelliert, solange diese keinen eigenen Haushalt bilden. Daher wird, mit der Annahme, dass jeder Haushalt mit mindestens drei Personen aus zwei Eltern und Kindern besteht, die Veränderung $\Delta HG_b^{Kinderauszug}$ der Größe des Haushalts b durch Kinderauszug basierend auf einer Wahrscheinlichkeit PKA für den Auszug eines Kindes im nächsten Jahr bestimmt.

$$\begin{aligned} \Delta HG_b^{Kinderauszug}(t) &= \begin{cases} -1 & \text{mit W.keit } \max(0, HG_b(t) - 2) * PKA \\ 0 & \text{mit W.keit } (1 - \max(0, HG_b(t) - 2) * PKA) \end{cases} \end{aligned} \quad (5.86)$$

Für Haushalte mit mehreren Kindern wird diese Wahrscheinlichkeit linear erhöht. Für die Ausgezogenen werden zunächst die Bewohnerattribute für einen Einpersonenhaushalt gesetzt, wobei jene auch direkt mit anderen Personen oder Haushalten zusammenziehen können (vgl. Teilen und Zusammenlegen).

Abbildung 16 zeigt die Altershäufigkeitsverteilung im Mikrozensus 2006 befragter Personen, die in einem Haushalt ohne Kinder wohnen und in den letzten 12 Monaten vor der Befragung umgezogen sind. Es zeigt sich, dass im Jahr 2005 die Umzugstätigkeit von Personen ohne Kinder im Alter von 20 bis 26

Jahren am höchsten war. Allerdings kann nicht unterschieden werden, welche Personen bereits zuvor von „zu Hause“ ausgezogen waren. Daher wird als Alter für ausgezogene Kinder 20 Jahre angenommen. Dies entspricht der unteren Grenze des Intervalls mit den häufigsten Werten und einer Wahrscheinlichkeit *PKA* für den Auszug eines Kindes von 5%.

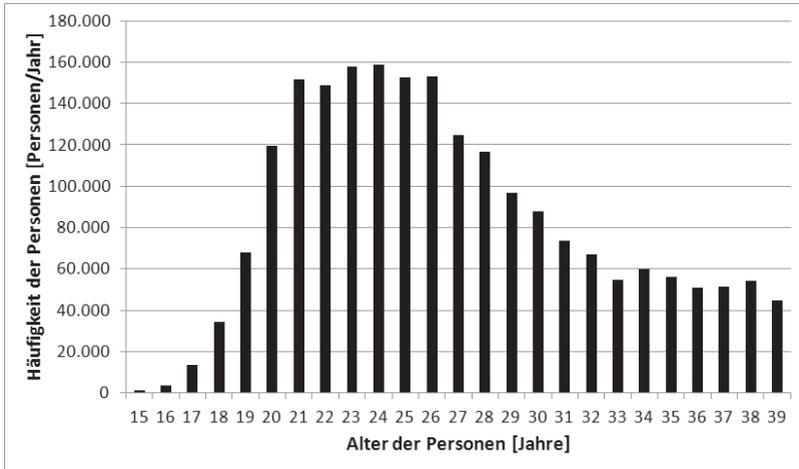


Abbildung 16: Altershäufigkeitsverteilung von Personen, die in einem Haushalt ohne Kinder wohnen (SUF EF669=0) und in den letzten 12 Monaten den Wohnsitz gewechselt haben (SUF EF451=8) mit einem Alter unter 40 Jahren (SUF EF44<40) (eigene Berechnung; Datengrundlage: Statistisches Bundesamt 2008c)

Tabelle 71 zeigt die Verteilung der Haushaltsnettoeinkommen, des Geschlechts und des höchsten schulischen/beruflichen Abschlusses 20-jähriger Einpersonenhaushalte. Beim Haushaltsnettoeinkommen und beim Bildungsgrad werden für die ausgezogenen Kinder mit 600 € pro Monat und der Hoch-/Fachhochschulreife die Modalwerte bzw. die Klassenmitten angesetzt. Das Geschlecht wird mit einer Wahrscheinlichkeit von 44,2% männlich und von 55,8% weiblich angesetzt.

Tabelle 71: Verteilung der Haushaltsnettoeinkommen, des Geschlechts und des höchsten schulischen/beruflichen Abschlusses 20-jähriger Einpersonenhaushalte im Jahr 2006 (eigene Berechnung; Datengrundlage: Statistisches Bundesamt 2008c)

Merkmal	Ausprägung	Anteil
Haushaltsnettoeinkommen	150 bis unter 300 €	4,0%
	300 bis unter 500 €	25,5%
	500 bis unter 700 €	30,6%
	700 bis unter 900 €	16,7%
	900 bis unter 1.100 €	9,4%
	≥ 1.100 €	10,0%
	Ohne Angabe	2,5%
Geschlecht	Männlich	44,2%
	Weiblich	55,8%
Höchster schul./berufl. Abschluss: Haupteinkommensbezieher (ISCED 97)	ISCED 1 (Ohne allgemeinen und ohne beruflichen Abschluss)	3,3%
	ISCED 2 (Haupt-/Realschulabschluss ohne berufl. Abschluss; Haupt-/Realschulabschluss mit Anlernausbildung, berufl. Praktikum oder Berufsvorbereitungsjahr)	26,6%
	ISCED 3a (Hoch-/Fachhochschulreife)	45,2%
	ISCED 3b (Lehrausbildung; berufsqualifizierender Abschluss an einer Berufsfachschule/Kollegschule, 1-jährige Schule des Gesundheitswesens)	23,3%
	ISCED 4a, b (Hoch-/Fachhochschulreife und Lehrausbildung; berufsqualifizierender Abschluss an einer Berufsfachschule/ Kollegschule, 1-jährige Schule des Gesundheitswesens)	1,1%
	ISCED 5b (Meister-/Techniker- oder gleichwertiger Fachschulabschluss, Abschluss einer 2- oder 3-jährigen Schule des Gesundheitswesens, Abschluss einer Fach- oder einer Berufsakademie; Abschluss der Fachschule der DDR; Abschluss einer Verwaltungsfachhochschule)	0,4%
	ISCED 5a (Fachhochschule, Hochschule)	0,2%
	ISCED 6 (Promotion)	0,0%

Teilen und Zusammenlegen

Neben dem Auszug der Kinder können Haushalte u. a. wegen Trennungen und Scheidungen aufgeteilt und bspw. wegen des Zusammenziehens mit dem Partner zusammengelegt werden. Abbildung 17 gibt eine Übersicht über die Modellierung von Zusammenlegung und Teilen der Haushalte. Mehrpersonenhaushalte teilen sich in *AWOHHM* mit einer vom Alter AL des Haupteinkommensbeziehers abhängigen Wahrscheinlichkeit PT_{AL} auf zwei Haushalte auf. Diese haben dasselbe Alter des Haupteinkommensbeziehers, denselben Bildungsgrad und denselben Hochrechnungsfaktor. Einer der Haushalte ist ein Einpersonenhaushalt mit einem männlichen Haupteinkommensbezieher. Der andere Haushalt erhält die übrigen Haushaltsmitglieder und einen weiblichen Haupteinkommensbezieher. Das Haushaltsnettoeinkommen wird nach Köpfen verteilt. Der größere Haushalt bleibt in der Wohnung und der andere zieht aus. Im Falle gleichgroßer Haushalte bleibt der ursprüngliche Haupteinkommensbezieher in der Wohnung.

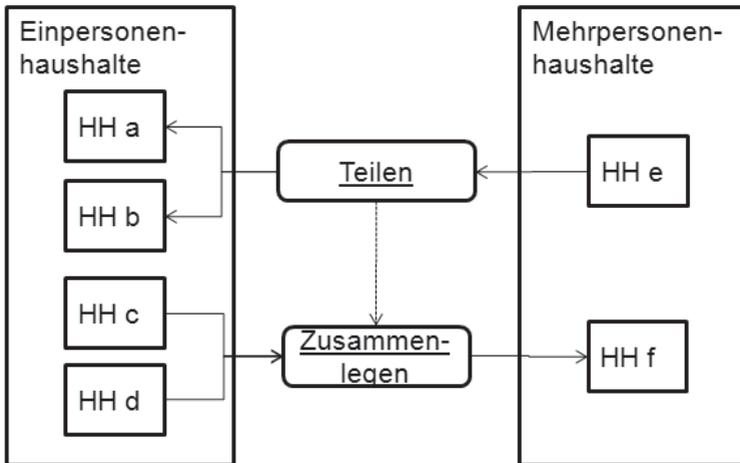


Abbildung 17: Übersicht über die Modellierung von Zusammenlegen und Teilen der Haushalte in *AWOHM*; HH: Haushalt

Als altersabhängige Wahrscheinlichkeiten PT_{AL} für das Teilen eines Mehrpersonenhaushalts durch Trennungen und Scheidungen werden die altersabhängigen jährlichen Scheidungsraten aus dem Jahr 2011 angesetzt (vgl. Tabelle 72). Da diese zwischen den Geschlechtern kaum variieren, werden die über das Geschlecht gemittelten Werte verwendet.

Tabelle 72: Altersverteilung von Ehepaaren, geschiedenen Ehen und Scheidungsraten (eigene Berechnung; Datengrundlage: Statistisches Bundesamt 2012b, 2012d)

Alter (von ... bis unter ... Jahren)	Differenziert nach Alter des Ehemanns			Differenziert nach Alter der Ehefrau			Mittelwert der jährlichen Scheidungsraten
	Ehepaare im Jahr 2011	Geschiedene Ehen 2011	Jährliche Scheidungsrate	Ehepaare im Jahr 2011	Geschiedene Ehen 2011	Jährliche Scheidungsrate	
unter 25	64.000	1.618	2,5%	189.000	4.727	2,5%	2,5%
25 - 35	1.277.000	29.363	2,3%	1.893.000	42.822	2,3%	2,3%
35 - 45	3.159.000	63.335	2,0%	3.511.000	66.847	1,9%	2,0%
45 - 55	4.256.000	65.693	1,5%	4.385.000	56.747	1,3%	1,4%
55 - 65	3.754.000	21.834	0,6%	3.667.000	13.569	0,4%	0,5%
65 - 75	3.436.000	5.056	0,1%	2.999.000	2.638	0,1%	0,1%
75 und älter	2.063.000	741	0,0%	1.364.000	290	0,0%	0,0%
Summe	18.009.000	187.640	1,0%	18.008.000	187.640	1,0%	1,0%

Einpersonenhaushalte¹²² können mit einer altersabhängigen Wahrscheinlichkeit PZ_{AL} mit einem anderen Einpersonenhaushalt mit ähnlichen Eigenschaften, d. h. aus derselben Instanz der Klasse Bewohner, zusammengelegt werden. Dadurch verdoppelt sich die Haushaltsgröße, das Geschlecht des Haupteinkommensbeziehers wird zufällig mit Wahrscheinlichkeiten von je 50% gewählt, die Haushaltsnettoeinkommen addieren sich, der Bildungsgrad bleibt identisch und der Hochrechnungsfaktor halbiert sich. Der zusammengelegte Haushalt sucht eine neue Wohnung und wechselt ggf. zuvor den Wohnungsmarkt.

Die Wahrscheinlichkeiten für das Zusammenlegen eines Einpersonenhaushalts (mit einem anderen Haushalt) wurden auf Basis der Ergebnisse des Mikrozensus 2006 kombiniert mit Sterberaten und Trennungs- bzw. Scheidungsraten abgeschätzt (vgl. Abbildung 18). Dabei wurde für jedes Alter die Anzahl der Ein- und Mehrpersonenhaushalte bestimmt und diese um erwartete Trennungen und Todesfälle korrigiert. Anschließend wurde der Anteil der Mehrpersonenhaushalte nach Trennungen und Tod für diesen Altersjahrgang mit dem Anteil der Mehrpersonenhaushalte vor Scheidungen und Tod für den nächsthöheren Altersjahrgang verglichen. Dadurch konnte die Zusammenlegungswahrscheinlichkeit bestimmt werden, die notwendig wäre, um den Mehrpersonenhaushaltsanteil des nächsthöheren Altersjahrgangs zu treffen. Diese Wahrscheinlichkeiten wurden über 5 Jahre geglättet. Dem Vorgehen liegt die Annahme zugrunde, dass der Anteil der Einpersonenhaushalte an allen Haushalten für eine Altersklasse (im Gegensatz zum Geburtsjahr) konstant bleibt. Die Wahrscheinlichkeit beträgt 9% bis 14% für 20- bis 50-Jährige und sinkt anschließend bis auf 0% für ca. 70-Jährige ab. Die negativen Werte in Abbildung 18 können auf die Verwendung rein altersabhängiger Sterbewahrscheinlichkeiten zurückgeführt werden. Die Werte werden zudem mit zunehmendem Alter weniger belastbar, da die Fallzahl sinkt. In *AWOHM* werden nach einer

¹²² Alleinerziehende werden in *AWOHM* derzeit als Paar interpretiert. Dies bietet einen Ansatzpunkt für zukünftige Modellerweiterungen.

Plausibilisierung der Haushaltsentwicklung 11% für 20- bis 50-Jährige, eine lineare Abnahme von 11% für 50-Jährige bis auf 0% für 70-Jährige und 0% für alle anderen Fälle angesetzt.

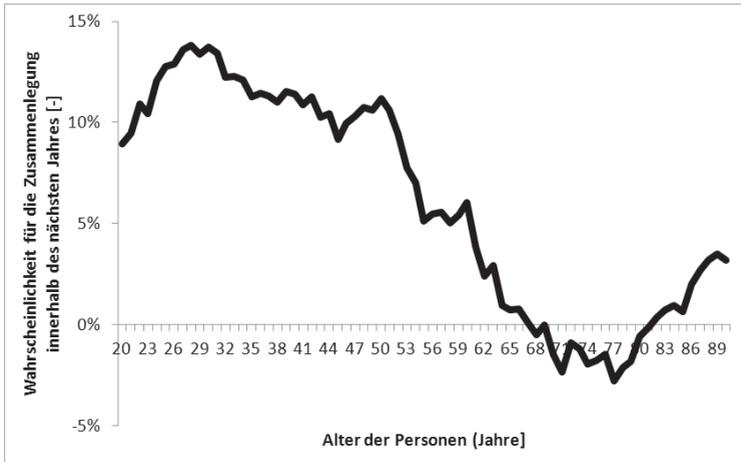


Abbildung 18: Über 5 Jahre geglättete Wahrscheinlichkeit für die Zusammenlegung von Einpersonenhaushalten (mit einem anderen) innerhalb des nächsten Jahres (eigene Berechnung; Datengrundlage: Statistisches Bundesamt 2008c, 2012b, 2012c, 2012d)

5.5.2 Wohnungsmarktwechsel

In Anbetracht der Datenverfügbarkeit im SUF des Mikrozensus 2006 wird in *AWOHM* ein Wohnungsmarkt definiert als Kombination von Bundesland pb und Gemeindegrößenklasse pgk . Das Ausland $pb_{Ausland}$ wird mit der fiktiven Gemeindegrößenklasse $pgk_{Ausland}$ ebenfalls als Wohnungsmarkt bzw. eigentlich als Quelle und Senke von Personen und Haushalten betrachtet.

Nach der Haushaltsveränderung im engeren Sinne wird jedem Haushalt b eine vom Herkunftsbundesland pb_1 und dem Zielbundesland pb_2 bzw. Ausland $pb_{Ausland}$ abhängige Wohnungsmarktwechselwahrscheinlichkeit PWM_{pb_1, pb_2} zugeordnet. Als Wahrscheinlichkeiten werden die in Tabelle 73 angegebenen Werte angesetzt, die für jedes Bundesland angeben, welcher Anteil der Bevölkerung im Jahr 2010 im selben Bundesland über Gemeindegrenzen hinweg, in

ein anderes Bundesland oder ins Ausland umgezogen ist. In der Tabelle ist auch die Personenzahl AP_{pb} der Personen angegeben, die vom Ausland in ein Bundesland pb gezogen sind. Es wird angenommen, dass diese Anteile und die Zuwanderungszahlen aus dem Ausland konstant sind. Die Wahrscheinlichkeit $PW_{b,pb,pgk}$ für einen Haushalt b , in einen durch das Bundesland pb und die Gemeindegrößenklasse pgk definierten Wohnungsmarkt bzw. das Ausland einzutreten, sei:

$$PW_{b,pb,pgk} = PWM_{pb,pb} * PWM_{pb,pgk} \quad (5.87)$$

$PWM_{pb,pgk}$ ist dabei die Wahrscheinlichkeit für einen in das Bundesland pb ziehenden bzw. in diesem den Wohnungsmarkt wechselnden Haushalt, in die Gemeindegrößenklasse pgk zu ziehen. Für diese wird gemäß Tabelle 74 die nach Bundesländern differenzierte Verteilung der innerhalb des Jahres 2005 eingezogenen Personen auf Gemeindegrößenklassen angesetzt.¹²³ Die zugrundeliegenden Daten und die daraus abgeleiteten Wahrscheinlichkeiten beziehen sich auf Personen. Da es sich um relative Aussagen handelt, wurden diese auf die Modellierungseinheit beim Wohnungsmarktwechsel, den Haushalt, übertragen. Bei dem in *AWOHHM* umgesetzten Ansatz ziehen alle Haushalte eines Wohnungsmarktes mit einer von ihren Eigenschaften wie bspw. dem Alter unabhängigen Wahrscheinlichkeit um. Der Ansatz kann dahingehend weiterentwickelt werden, dass die Wahrscheinlichkeiten als von den Haushaltseigenschaften abhängig modelliert werden. Somit kann eine abnehmende Umzugshäufigkeit der höheren Altersklassen abgebildet werden.

¹²³ Bei diesen Daten sind allerdings auch die innerhalb eines Wohnungsmarktes umgezogenen Personen enthalten. Diese Art des Umzugs wird, wie auch der konkrete Einzug der Haushalte mit Wohnungsmarktwechsel, durch die Wohnungssuche (vgl. Abschnitt 5.5.3) modelliert.

Tabelle 73: Anteil der Bevölkerung eines Bundeslands, der 2010 im selben Bundesland (über Gemeindegrenzen hinweg), in ein anderes Bundesland oder ins Ausland umgezogen ist, sowie Zuwanderung aus dem Ausland je Bundesland (eigene Berechnung; Datengrundlage: Statistisches Bundesamt 2012a, 2012e)

Datenart	Zielland																		
	Herkunftsland	Baden-Württemberg	Bayern	Berlin	Brandenburg	Bremen	Hamburg	Hessen	Mecklenburg-Vorpommern	Niedersachsen	Nordrhein-Westfalen	Rheinland-Pfalz	Saarland	Sachsen	Sachsen-Anhalt	Schleswig-Holstein	Thüringen	Ausland	
Anteil der Bevölkerung, die 2010 vom Ausland in das Zielland umgezogen ist [% ⁰⁰]	Baden-Württemberg	39	3	1	0	0	0	2	0	1	2	1	0	0	0	0	0	11	
	Bayern	3	38	1	0	0	0	1	0	1	1	0	0	1	0	0	0	8	
	Berlin	2	2	0	8	0	1	1	1	1	2	0	0	0	1	1	0	18	
	Brandenburg	1	1	10	25	0	1	1	1	1	1	0	0	2	1	1	0	3	
	Bremen	1	1	2	0	1	2	1	0	19	3	1	0	1	0	1	0	13	
	Hamburg	1	1	2	0	1	0	1	1	7	2	0	0	0	0	0	12	0	
	Hessen	2	2	1	0	0	0	34	0	1	3	2	0	0	0	0	1	11	
	Mecklenburg-Vorpommern	1	1	3	2	0	3	1	35	2	2	0	0	1	1	3	0	3	
	Niedersachsen	1	1	1	0	2	2	1	0	33	4	0	0	0	1	1	0	8	
	Nordrhein-Westfalen	1	1	1	0	0	0	1	0	2	29	1	0	0	0	0	0	8	
	Rheinland-Pfalz	4	1	1	0	0	0	4	0	2	4	38	1	0	0	0	0	7	
	Saarland	2	1	1	0	0	0	1	0	1	2	5	30	0	0	0	0	6	
	Sachsen	1	2	1	1	0	0	1	0	1	1	0	0	25	1	0	1	5	
	Sachsen-Anhalt	1	1	2	1	0	0	1	1	3	2	0	0	3	23	0	1	3	
	Schleswig-Holstein	1	1	1	0	0	7	1	1	3	2	0	0	0	0	41	0	5	
	Thüringen	1	3	1	1	0	0	2	0	1	1	0	0	3	1	0	25	3	
	Personenzahl, die 2010 vom Ausland in das Zielland umgezogen ist [1000]		136	140	60	11	9	26	77	7	163	33	8	20	9	16	8	8	-

Tabelle 74: Verteilung der innerhalb des Jahres 2005 eingezogenen Personen auf Gemeindegrößenklassen differenziert nach Bundesländern (eigene Berechnung; Datengrundlage: Statistisches Bundesamt 2008c); -: diese Gemeindegrößenklasse wird in diesem Bundesland entweder durch andere Klassen abgedeckt oder durch die Erhebung nicht abgedeckt

Bundesland	Gemeindegrößenklasse [Tausend Einwohner]							Summe
	0-20	0-5	5-20	20-500	20-100	100-500	>500	
Baden-Württemberg	-	11%	31%	-	33%	19%	6%	100%
Bayern	-	16%	33%	-	20%	18%	13%	100%
Berlin	-	-	-	-	-	-	100%	100%
Brandenburg	-	15%	37%	48%	-	-	-	100%
Bremen	-	-	-	-	-	-	100%	100%
Hamburg	-	-	-	-	-	-	100%	100%
Hessen	39%	-	-	-	29%	18%	14%	100%
Mecklenburg-Vorpommern	-	28%	22%	50%	-	-	0%	100%
Niedersachsen	-	9%	26%	-	35%	22%	8%	100%
Nordrhein-Westfalen	9%	-	-	-	38%	32%	21%	100%
Rheinland-Pfalz	-	34%	20%	-	32%	14%	-	100%
Saarland	-	-	30%	70%	-	-	-	100%
Sachsen	-	11%	22%	0%	22%	45%	-	100%
Sachsen-Anhalt	41%	-	-	-	31%	28%	-	100%
Schleswig-Holstein	-	19%	27%	-	32%	22%	-	100%
Thüringen	-	21%	14%	-	29%	36%	-	100%

Mit dem beschriebenen Ansatz können, ausgehend vom Haushaltsbestand zum Zeitpunkt t , gemäß den genannten Wahrscheinlichkeiten durch Zufallsziehung für jeden Wohnungsmarkt die wegziehenden und die aus anderen Wohnungsmärkten im Inland zuziehenden Haushalte bestimmt werden. Um für jeden Wohnungsmarkt die zuziehenden an der Wohnungssuche beteiligten Haushalte zu bestimmen, müssen noch die aus dem Ausland zuziehenden Haushalte berücksichtigt werden. Basis hierfür ist die als konstant angenommene Personenzahl AP_{pb} der Personen, die vom Ausland in ein Bundesland pb ziehen (vgl. Tabelle 73). Als Verteilung dieser Personen auf Gemeindegrößenklassen pgk wird die Wahrscheinlichkeit $PWM_{pb,pgk}$ verwendet. Es wird angenommen, dass diese Personen in Dreipersonenhaushalten (Mittelwert) mit einem Haushaltsnettoeinkommen von 1.840 €/Monat (Mittelwert) sowie einem männlichen 35-jährigen Haupteinkommensbezieher (Mittelwert) mit Lehrausbildung bzw. einem berufsqualifizierendem Abschluss an einer Berufsfachschule, Kollegschule oder einer 1-jährigen Schule des Gesundheitswesens (Modalwert) leben (Statistisches Bundesamt 2008c). Es wird je Wohnungsmarkt für jeweils $170 * 3$ Zuwanderer ein derartiger Haushalt mit entspre-

chendem *Hochrechnungsfaktor* HRF_b von 170/1000 (typische Größenordnung für SUF-Hochrechnungsfaktoren) angesetzt.

$$HRF_b = AP_{pb}/(170 * 3 * 1000) \quad (5.88)$$

Da Neubauanzahl sowie Abbruchraten exogen vorgegeben und nicht modellendogen bestimmt werden, kann es bei dem beschriebenen Ansatz vorkommen, dass in einem Wohnungsmarkt leerstehende Wohnungen nicht in ausreichender Zahl zur Verfügung stehen. In diesem Falle werden proportional zum Platzangebot in anderen inländischen Wohnungsmärkten die entsprechenden Zuwandererströme reduziert bzw., falls nötig, ergänzend die Auswandererströme erhöht, indem die Wohnungsmarktwechselwahrscheinlichkeiten angepasst werden.

Verlässt ein Haushalt b , der nicht in derselben Periode durch Trennung oder Kinderauszug entstanden ist, einen Wohnungsmarkt bzw. zieht in diesem über Gemeindegrenzen hinweg um, so wird von diesem Haushalt modellstrukturbedingt eine Kopie erstellt, und bei dem Originalhaushalt der Anteil des Leerstands am Hochrechnungsfaktor auf 1 gesetzt. Dadurch steht die Wohnung im ursprünglichen Wohnungsmarkt leer und kann von anderen Haushalten im Rahmen der Wohnungssuche bezogen werden. Haushalte, die trennungsbedingt durch Auszug oder durch Kinderauszug entstanden sind, werden ohnehin neu erstellt und hinterlassen keine leerstehende Wohnung.

5.5.3 Wohnungssuche

Nach der Haushaltsveränderung im engeren Sinne und einem etwaigen Wohnungsmarktwechsel stehen für jeden durch Bundesland und Gemeindegroßenklasse definierten Wohnungsmarkt die Haushalte zum Zeitpunkt $t + 1$ fest. Zudem sind ausgehend von den Wohnungen zum Zeitpunkt t die nach Neubau, Sanierung und Abbruch zum Zeitpunkt $t + 1$ existenten Wohnungen je Wohnungsmarkt bekannt. Im Prozess der Wohnungssuche wird auf jedem Wohnungsmarkt für jeden Haushalt die zugehörige Wohnung determiniert, sodass die Verteilung der Haushalte auf die Wohnungen zum Zeitpunkt $t + 1$ resultiert.

5.5.3.1 Ansatz der Wohnungssuche

Im Folgenden wird beschrieben, wie in einem konkreten Wohnungsmarkt mit Bundesland pb und Gemeindegrößenklasse pgk die wohnungssuchenden Haushalte auf die Wohnungen verteilt werden. Die an der Wohnungssuche beteiligten Haushalte unterteilen sich einerseits in Haushalte $b \in B_{NEU,pb,pgk}$, die wegen Haushaltsveränderungen (vgl. Abschnitt 5.5.1) oder Umzug von anderen Wohnungsmärkten in diesen Wohnungsmarkt bzw. in diesem Wohnungsmarkt über Gemeindegrenzen hinweg (vgl. Abschnitt 5.5.2) noch keine Wohnung bewohnen. Andererseits umfassen sie auch Haushalte $b \in B_{ALT,pb,pgk}$, die mit einer Wahrscheinlichkeit $p_{Suche\ Wohnender}$ für den nicht gemeindegrenzenüberschreitenden Umzug aus allen Haushalten mit Wohnung in diesem Wohnungsmarkt gezogen wurden. Alle Haushalte $b \in B_{ALT,pb,pgk}$ entsprechen Kopien der Originalhaushalte. Bei den Originalhaushalten wird der Anteil des Leerstands am Hochrechnungsfaktor auf 1 gesetzt, sodass leerstehende Wohnungen zurückbleiben. Es sei $pgf(b, w)$ eine die Passgenauigkeit von Haushalt b und Wohnung w determinierende Funktion. Diese hängt von den Wohnungseigenschaften und den Haushaltscharakteristika ab. Im Folgenden werden die Modellierungsschritte der Wohnungssuche in *Pseudocode* beschrieben. Diese sind an die Arbeit von Ettema (2011) zum Kauf und Verkauf von Wohnungen in den Niederlanden angelehnt.

Schritt A

Ein Haushalt $b \in B_{NEU,pb,pgk} \cup B_{ALT,pb,pgk}$ mit $ALH_b < 1$ wird (ohne Zurücklegen) gezogen und für diesen eine Liste aus Dupeln $[pgf(b, w), w]; \forall w \in W_{pb,pgk}$ bestimmt. Die Dupel werden nach absteigendem pgf sortiert. Falls alle Haushalte gezogen wurden, endet die Wohnungssuche.

Schritt B

Aus der Dupelliste wird das erste Dupel $[pgf, w]$ mit $ALH_{b_w} > 0$ ausgewählt. Ziel ist dabei, dass der jeweilige Haushalt in die leerstehende Wohnung mit der größten Passgenauigkeit einzieht.

Schritt C

Falls in den durch die Wohnung w repräsentierten Wohnungen ausreichend Platz für die durch den Haushalt b repräsentierten Haushalte ist, d. h. falls $HRF_b * (1 - ALH_b) \leq HRF_{b_w} * ALH_{b_w}$, zieht der Haushalt b vollständig in die Wohnung w ein (Andernfalls wird Schritt C übersprungen). Für Haushaltsgröße, Haushaltsnettoeinkommen sowie Alter, Bildungsgrad und Geschlecht des Haupteinkommensbeziehers gelte (Rd steht für *Runde*)

$$HG_{b_w}^{neu} = Rd \left(\frac{HRF_{b_w} * (1 - ALH_{b_w}) * HG_{b_w} + HRF_b * (1 - ALH_b) * HG_b}{HRF_{b_w} * (1 - ALH_{b_w}) + HRF_b * (1 - ALH_b)} \right) \quad (5.89)$$

$$EK_{b_w}^{neu} = \frac{HRF_{b_w} * (1 - ALH_{b_w}) * EK_{b_w} + HRF_b * (1 - ALH_b) * EK_b}{HRF_{b_w} * (1 - ALH_{b_w}) + HRF_b * (1 - ALH_b)} \quad (5.90)$$

$$AI_{b_w}^{neu} = Rd \left(\frac{HRF_{b_w} * (1 - ALH_{b_w}) * AI_{b_w} + HRF_b * (1 - ALH_b) * AI_b}{HRF_{b_w} * (1 - ALH_{b_w}) + HRF_b * (1 - ALH_b)} \right) \quad (5.91)$$

$$BG_{b_w}^{neu} = \begin{cases} BG_{b_w}, & \text{falls } HRF_{b_w} * (1 - ALH_{b_w}) \geq HRF_b * (1 - ALH_b) \\ BG_b, & \text{sonst} \end{cases} \quad (5.92)$$

$$GH_{b_w}^{neu} = \begin{cases} GH_{b_w}, & \text{falls } HRF_{b_w} * (1 - ALH_{b_w}) \geq HRF_b * (1 - ALH_b) \\ GH_b, & \text{sonst} \end{cases} \quad (5.93)$$

Der Anteil des Leerstands am Hochrechnungsfaktor für die Wohnung wird durch $ALH_{b_w}^{neu} = ALH_{b_w} - (1 - ALH_b) * HRF_b / HRF_{b_w}$ entsprechend reduziert. Alle durch den Haushalt b repräsentierten Haushalte sind vollständig auf die durch die Wohnung w repräsentierten Wohnungen verteilt. Schritt A wird wiederholt.

Schritt D

Falls in den durch die Wohnung w repräsentierten Wohnungen nicht ausreichend Platz für die durch den Haushalt b repräsentierten Haushalte ist, d. h. falls $HRF_b * (1 - ALH_b) > HRF_{b_w} * ALH_{b_w}$, werden die noch leerstehenden Wohnungen vollständig mit von Haushalt b repräsentierten Haushalten gefüllt. Für Haushaltsgröße, Haushaltsnettoeinkommen sowie Alter, Bildungsgrad und Geschlecht des Haupteinkommensbeziehers gelte

$$HG_{b_w}^{neu} = Runde((1 - ALH_{b_w}) * HG_{b_w} + ALH_{b_w} * HG_b) \quad (5.94)$$

$$EK_{b_w}^{neu} = (1 - ALH_{b_w}) * EK_{b_w} + ALH_{b_w} * EK_b \quad (5.95)$$

$$AL_{b_w}^{neu} = Runde((1 - ALH_{b_w}) * AL_{b_w} + ALH_{b_w} * AL_b) \quad (5.96)$$

$$BG_{b_w}^{neu} = \begin{cases} BG_b, & \text{falls } ALH_{b_w} \geq 0.5 \\ BG_{b_w}, & \text{sonst} \end{cases} \quad (5.97)$$

$$GH_{b_w}^{neu} = \begin{cases} GH_b, & \text{falls } ALH_{b_w} \geq 0.5 \\ GH_{b_w}, & \text{sonst} \end{cases} \quad (5.98)$$

Für den Anteil des Leerstands am Hochrechnungsfaktor gilt dann $ALH_{b_w}^{neu} = 0$. Die Menge der durch Haushalt b repräsentierten Haushalte, die noch in andere Wohnungen einziehen müssen, wird indirekt festgelegt durch

$$ALH_b^{neu} = [ALH_b * HRF_b + HRF_{b_w} * ALH_{b_w}] / HRF_b \quad (5.99)$$

Da nicht alle durch Haushalt b repräsentierten Haushalte vollständig auf Wohnungen verteilt sind, wird Schritt B wiederholt.

5.5.3.2 Passgenauigkeitsfunktion

Voraussetzung für den Ansatz der Wohnungssuche ist die Passgenauigkeitsfunktion $pgf(b, w)$ für Haushalte b und Wohnungen w . Die Passgenauigkeitsfunktion wird auf Basis der Passgenauigkeitsfunktionen $pgf_{ES}(b, w)$ für den Eigentumsstatus, $pgf_{WG}(b, w)$ für die Wohnungsgröße und $pgf_{KM}(b, w)$ für die Kaltmiete definiert.

$$pgf(b, w) = \min \{pgf_{ES}(b, w), pgf_{WG}(b, w), pgf_{KM}(b, w)\} \quad (5.100)$$

Die Passgenauigkeitsfunktionen $pgf_{ES}(b, w)$, $pgf_{WG}(b, w)$ und $pgf_{KM}(b, w)$ werden dabei von der Wohnsituation im Jahr 2006 auf Basis des SUF des Mikrozensus 2006 und weiterer Informationen aus *AWOHH* abgeleitet.

Eigentumsstatus

Garner & Short (2009) schätzen die Wahrscheinlichkeit p_{Mieter} , Mieter zu sein, als *Logit*-Modell.

$$p_{Mieter} = \frac{e^{\vec{\alpha}^T * \vec{x}}}{1 + e^{\vec{\alpha}^T * \vec{x}}} \quad (5.101)$$

Dabei ist \vec{x} ein Vektor von Haushalts-, Wohnungs- und Gebäudeeigenschaften und $\vec{\alpha}$ ein Vektor zu schätzender Koeffizienten. Dieser Ansatz wurde an die Datenlage angepasst und auf *AWOHM* übertragen. Preise für Wohneigentum werden bspw. in *AWOHM* nicht abgebildet und können daher nicht in die Passgenauigkeitsfunktionen einfließen. Tabelle 75 spezifiziert die unabhängigen Variablen, die zur Schätzung der Wahrscheinlichkeit, Mieter zu sein, in den Vektor \vec{x} aufgenommen wurden. Das Maximum des Betrags des Korrelationskoeffizienten nach Pearson¹²⁴ zwischen je zwei dieser Variablen beträgt 0,591. Dadurch kann Multikollinearität nicht bestätigt, aber auch nicht ausgeschlossen werden (vgl. Backhaus u. a. 2003). Auf eine tiefergehende Analyse der Multikollinearität wird jedoch im Folgenden verzichtet.

Tabelle 75: Variablen für die Schätzung der Wahrscheinlichkeit, Mieter zu sein, der Kaltmiete und der Wohnungsgröße; *: Der Bildungsgrad wird als metrische Variable behandelt.

Variablentyp	Variablenname	Einheit	Skala	Enthalten in
Haushaltseigenschaften	Alter des Haupteinkommensbeziehers	Jahre	Metrisch	\vec{x}, \vec{z}
	Haushaltsnettoeinkommen	€/Monat	Metrisch	\vec{x}, \vec{z}
	Haushaltsgröße	Personen	Metrisch	\vec{x}, \vec{z}
	Bildungsgrad*	-	Ordinal	\vec{x}, \vec{z}
Gebäudeeigenschaften	Anzahl Wohneinheiten	Wohneinheiten	Metrisch	\vec{x}, \vec{z}
	Baujahr	Jahre	Metrisch	\vec{x}, \vec{z}
Wohnungseigenschaften	Wohnungsgröße	m ²	Metrisch	\vec{x}, \vec{z}
	Energiekosten (berechnet)	€/m ² Monat	Metrisch	\vec{x}, \vec{z}
	Kalte Nebenkosten	€/m ² Monat	Metrisch	\vec{z}

Es wird angenommen, dass Selbstnutzerwohnungen (0) und Mietwohnungen (1) den Eigentumsstatus beibehalten. Der Vektor $\vec{\alpha}$ wurde mithilfe von SPSS auf Basis des SUF des Mikrozensus 2006 und der in *AWOHM* berechneten Energiekosten geschätzt. Die Auswahl der unabhängigen Variablen erfolgte subjektiv, ausgehend von einer längeren von *AWOHM* bereitstellbaren Variablenliste, durch sukzessive Elimination von Variablen. Als Basis hierfür dienten die Signifikanzniveaus der geschätzten Koeffizienten und die Modellgüte, die über den Anteil der bei einem Trennwert von 0,5 richtig vorhergesagten Fälle beurteilt wurde. In *AWOHM* wird folgende Passgenauigkeitsfunktion $pgf_{ES}(b, w)$ verwendet.

¹²⁴ Vgl. Janssen & Laatz 2007 bez. des Korrelationskoeffizienten nach Pearson.

$$pgf_{ES}(b, w) = \begin{cases} p_{Mieter}(b, w) & \text{für Mietswohnung} \\ 1 - p_{Mieter}(b, w) & \text{für Selbstnutzerwohnung} \end{cases} \quad (5.102)$$

$$\text{mit } p_{Mieter}(b, w) = \frac{e^{\begin{pmatrix} 3,497 \\ -0,027 \\ -0,00008 \\ -0,018 \\ -0,063 \\ 1,305 \\ -0,001 \\ -0,023 \\ 0,132 \end{pmatrix}^T \begin{pmatrix} 1 \\ \text{Alter des Haupteinkommensbeziehers} \\ \text{Haushaltsnettoeinkommen} \\ \text{Haushaltsgröße} \\ \text{Bildungsgrad} \\ \text{Anzahl Wohneinheiten} \\ \text{Baujahr} \\ \text{Wohnungsgröße} \\ \text{Energiekosten (berechnet)} \end{pmatrix}}{1 + e^{\begin{pmatrix} 3,497 \\ -0,027 \\ -0,00008 \\ -0,018 \\ -0,063 \\ 1,305 \\ -0,001 \\ -0,023 \\ 0,132 \end{pmatrix}^T \begin{pmatrix} 1 \\ \text{Alter des Haupteinkommensbeziehers} \\ \text{Haushaltsnettoeinkommen} \\ \text{Haushaltsgröße} \\ \text{Bildungsgrad} \\ \text{Anzahl Wohneinheiten} \\ \text{Baujahr} \\ \text{Wohnungsgröße} \\ \text{Energiekosten (berechnet)} \end{pmatrix}}}$$

Die geschätzten Koeffizienten sind alle zu einem Niveau von höchstens 0,3% signifikant (vgl. Tabelle 76). In 82,5% der Fälle war die zu dem tatsächlichen Eigentumsstatus gehörende Wahrscheinlichkeit größer als 0,5, bei den Selbstnutzern (n=96.951) in 75,5% der Fälle und bei den Mietern (n=129.878) in 87,8% der Fälle. Tendenziell wohnen ältere, größere und gebildetere Haushalte sowie Haushalte mit höherem Einkommen eher als Selbstnutzer. In Gebäuden mit mehr Wohneinheiten sowie bei kleineren Wohnungen nimmt bspw. die Wahrscheinlichkeit, Selbstnutzer zu sein, ab.

Tabelle 76: Mittels SPSS geschätzte Koeffizienten von $p_{Mieter}(b, w)$ (eigene Berechnung; Datengrundlage: Statistisches Bundesamt 2008c)

Variablenname	Regressionskoeffizient	Standardfehler	Wald-Schätzer	Freiheitsgrade	Signifikanzniveau
Alter des Haupteinkommensbeziehers	-0,027	0,000	5.117,005	1	0,000
Haushaltsnettoeinkommen	0,000	0,000	353,514	1	0,000
Haushaltsgröße	-0,018	0,006	8,582	1	0,003
Bildungsgrad	-0,063	0,004	254,432	1	0,000
Anzahl Wohneinheiten	1,305	0,008	27.333,225	1	0,000
Baujahr	-0,001	0,000	35,659	1	0,000
Wohnungsgröße	-0,023	0,000	10.032,292	1	0,000
Energiekosten (berechnet)	0,132	0,007	390,466	1	0,000
Konstante	3,497	0,372	88,233	1	0,000

Kaltmiete

Garner & Short (2009) schätzen den Logarithmus der wohnflächenspezifischen Kaltmiete \overline{KM}_{Mieter} [€/m² Monat] als lineares Modell.

$$\overline{KM}_{Mieter} = \vec{\beta}' * \vec{z} + \varepsilon_1 \quad (5.103)$$

Dabei ist \vec{z} ein Vektor von Haushalts-, Wohnungs- und Gebäudeeigenschaften, $\vec{\beta}$ ein Vektor zu schätzender Koeffizienten und ε_1 eine normalverteilte Störgröße. Dieser Ansatz wurde an die Datenlage angepasst und auf *AWOHM* übertragen. Tabelle 75 spezifiziert die unabhängigen Variablen, die zur Schätzung der logarithmierten Kaltmiete in den Vektor \vec{z} aufgenommen wurden. Die Auswahl der unabhängigen Variablen erfolgte subjektiv, ausgehend von einer längeren Liste von *AWOHM* berechenbarer Variablen durch sukzessive Elimination von Variablen auf Basis der Signifikanzniveaus der geschätzten Koeffizienten und der durch R bzw. das Bestimmtheitsmaß R^2 beurteilten Modellgüte. In *AWOHM* wird basierend auf den als adäquat beurteilten Kaltmieten KM_{Mieter} [€/Monat] aus Sicht der Mieter und den tatsächlichen Mieten KM_w [€/Monat] der Wohnungen folgende Passgenauigkeitsfunktion $pgf_{KM}(b, w)$ verwendet.

$$pgf_{KM}(b, w) = 1 - \frac{\max(0, KM_w - KM_{Mieter}(b, w))}{KM_{Mieter}(b, w)} \quad (5.104)$$

mit

$$KM_{Mieter}(b, w) = A_w * e^{\left(\begin{matrix} -1,064 \\ -0,001 \\ 5,258 * 10^{-5} \\ 0,010 \\ 0,021 \\ 0,085 \\ 0,001 \\ -0,003 \\ -0,006 \\ 0,167 \end{matrix} \right)^T * \left(\begin{matrix} 1 \\ \text{Alter des Haupteinkommensbeziehers} \\ \text{Haushaltsnettoeinkommen} \\ \text{Haushaltsgröße} \\ \text{Bildungsgrad} \\ \text{Anzahl Wohneinheiten} \\ \text{Baujahr} \\ \text{Wohnungsgröße} \\ \text{Energiekosten (berechnet)} \\ \text{Kalte Nebenkosten} \end{matrix} \right)}$$

Die Koeffizienten wurden ebenfalls mit SPSS geschätzt (n=105.481) und sind signifikant zum Niveau von höchstens 0,1% (vgl. Tabelle 77). Die Erklärungsgüte ist mit $R=0,434$ niedrig, aber dennoch positiv. Die Güte ließe sich prinzipiell durch Hinzunahme weiterer Parameter verbessern. Die aktuelle Datenlage lässt dies allerdings nicht zu. Der *Variance Inflation Factor* (vgl. Heuer 2009) liegt bei maximal 1,831 und weist somit auf eine akzeptable Multikollinearität hin (vgl. Heuer 2009). Die standardisierten Residuen wurden optisch auf das Vorliegen einer Normalverteilung und Heteroskedastizität

geprüft (vgl. Backhaus u. a. 2003; Heuer 2009). Die Normalverteilungsannahme der Residuen ist plausibel und die Heteroskedastizität mit Ausnahme weniger Datenpunkte gering.

Tabelle 77: Mittels SPSS geschätzte Koeffizienten von KM^{Mieter} (eigene Berechnung; Datengrundlage: Statistisches Bundesamt 2008c)

Variablenname	Nicht standardisierte Koeffizienten		T-Schätzer	Signifikanzniveau
	Regressionskoeffizient	Standardfehler		
Konstante	-1,064	0,076	-13,950	0,000
Alter des Haupteinkommensbeziehers	-0,001	0,000	-19,375	0,000
Haushaltsnettoeinkommen	5,258E-5	0,000	51,279	0,000
Haushaltsgröße	0,010	0,001	7,987	0,000
Bildungsgrad	0,021	0,001	28,421	0,000
Anzahl Wohneinheiten	0,085	0,002	36,528	0,000
Baujahr	0,001	0,000	32,733	0,000
Wohnungsgröße	-0,003	0,000	-51,036	0,000
Energiekosten (berechnet)	-0,006	0,001	-4,953	0,000
Kalte Nebenkosten	0,167	0,002	93,939	0,000

Wohnungsgröße

Die Passgenauigkeitsfunktion $pgf_{WG}(b, w)$ für die Wohnungsgröße sei definiert als

$$pgf_{WG}(b, w) = 1 - \frac{|WG_{Soll}(b) - A_w|}{WG_{Soll}(b)} \tag{5.105}$$

mit

$$WG_{Soll}(b, w) = e^{\begin{pmatrix} 4,27 \\ 0,003 \\ 0,00004 \\ 0,126 \\ 0,026 \\ -0,226 \end{pmatrix}^T * \begin{pmatrix} 1 \\ \text{Alter des Haupteinkommensbeziehers} \\ \text{Haushaltsnettoeinkommen} \\ \text{Haushaltsgröße} \\ \text{Bildungsgrad} \\ \text{Anzahl Wohneinheiten} \end{pmatrix}}$$

Die Schätzung der Soll-Wohnfläche $WG_{Soll}(b, w)$ aus Sicht des Mieters erfolgt dabei analog zur Schätzung der Miete. Die Koeffizienten wurden wiederum mit SPSS auf Basis des SUF des Mikrozensus 2006 geschätzt (n=226.829). Gemäß den geschätzten Koeffizienten steigt die Soll-Wohnfläche mit zunehmendem Alter, Einkommen und Bildungsgrad sowie zunehmender Haushaltsgröße und sinkt mit der Anzahl der Wohneinheiten im Gebäude. Die Erklärungsgüte beträgt $R=0,723$. Alle Koeffizienten sind signifikant zum Niveau von höchstens 0,1%. Der *Variance Inflation Factor* (vgl. Heuer 2009) liegt bei maximal 1,304 und weist somit auf geringe Multikollinearität hin (vgl. Heuer 2009). Die standardisierten Residuen wurden optisch auf das Vorliegen einer Normalverteilung

lung und Heteroskedastizität geprüft (vgl. Backhaus u. a. 2003; Heuer 2009). Die Normalverteilungsannahme der Residuen ist plausibel und die Heteroskedastizität gering (wobei eine leichte Abnahme der Residuenvarianz bei zunehmenden vorhergesagten Werten zu erkennen ist).

5.6 Szenarien und Unsicherheiten

In Abschnitt 5.6.1 wird auf die Definition von Szenarien und die ihnen zugrundeliegenden Parameter eingegangen. Szenarien dienen teilweise dem Umgang mit Unsicherheiten von Modellergebnissen. Diese Unsicherheiten bzw. deren Analyse werden in Abschnitt 5.6.2 beschrieben. Zentraler Bestandteil der Szenarien sowie der Modellanwendung und -ergebnisinterpretation sind umweltpolitische Instrumente im Bereich Wärmenutzung in Wohngebäuden. Auf die Modellierung der umweltpolitischen Instrumente und ihrer Wirkungsweise wird in Abschnitt 5.6.3 eingegangen.

5.6.1 Szenarien

AWOHM kann als deterministische Funktion interpretiert werden, die einem Vektor von Eingangsgrößen einen Vektor von Ausgangsgrößen zuordnet. Ein derartiger Vektor von Eingangsgrößen, der zu einem eindeutigen Modelloutput führt, wird im Rahmen dieser Arbeit als Szenario im weiteren Sinne definiert. Als Szenario bzw. Szenario im engeren Sinne wird nur derjenige Teil dieses Vektors von Eingangsgrößen bezeichnet, der sich zwischen Modellläufen unterscheidet bzw. dessen Variation aus Sicht des Autors für weitere Modellanwendungen sinnvoll ist. Die Spezifikation von Szenarien unterteilt sich, wie in Abbildung 19 dargestellt, in die Spezifikation von *umweltpolitischen Instrumenten*, *Entscheidungsansätzen*, *aktivierten Modulen*, *Realisationen von Zufallsvariablen* sowie *sonstigen unsicheren Parametern*.

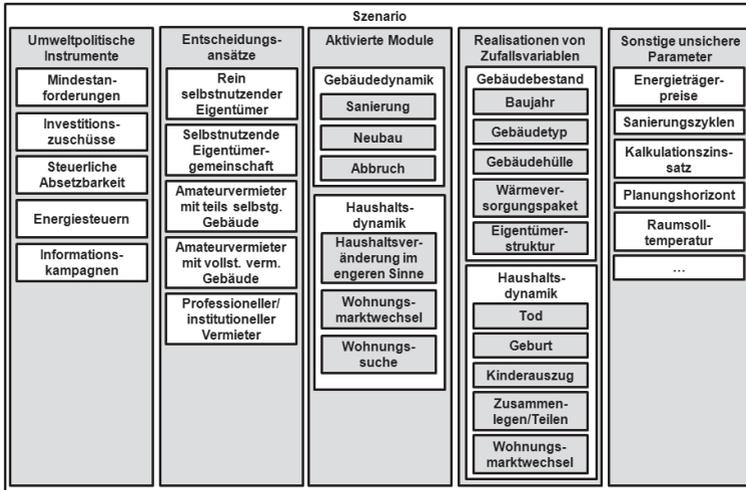


Abbildung 19: Übersicht über die Elemente eines Szenarios in *AWOHHM*

5.6.1.1 Umweltpolitische Instrumente

Mit *AWOHHM* sollen adäquate Bündel umweltpolitischer Instrumente im Bereich der Wärmenutzung in Wohngebäuden identifiziert und ihre Auswirkungen bewertet werden. Gemäß Kapitel 2 sind dabei ordnungsrechtliche, ökonomische und sozio-psychologische Instrumente von Bedeutung. In *AWOHHM* berücksichtigt werden Mindestanforderungen an die energetische Qualität der Gebäudehülle sowie die Qualität der Anlagentechnik, ferner Steuervorschriften, finanzielle Förderprogramme und (indirekt) Informationskampagnen. Die Instrumente verfügen über unterschiedliche Intensitätsstufen. Die Intensität kann für jede Simulationsperiode, d. h. jedes Jahr, separat gesetzt werden, damit sich die schrittweise Verschärfung umweltpolitischer Instrumente abbilden lässt. Die Gesamtheit aller Instrumente mit ihren jeweiligen Ausprägungen für jede Simulationsperiode wird als Bündel umweltpolitischer Instrumente bezeichnet. Um adäquate Bündel umweltpolitischer Instrumente zu identifizieren, werden unterschiedliche Bündel in Szenarien spezifiziert sowie deren Auswirkungen simuliert, analysiert und bewertet. Durch die Analyse der Auswirkungen können Rückschlüsse auf die Bewertung verbessernde Ausgestal-

tungen der Bündel gezogen werden. Eine detaillierte Beschreibung zur Modellierung der umweltpolitischen Instrumente findet sich in Abschnitt 5.6.3.

5.6.1.2 Entscheidungsansätze

Bei der Simulation der Auswirkungen konkreter Bündel umweltpolitischer Instrumente nimmt menschliches Verhalten in Form von Sanierungsentscheidungen eine zentrale Rolle ein. Da dieses nur mit großer Unsicherheit abgebildet werden kann, werden für die jeweiligen Eigentümerstrukturen der Gebäude teils annahmenbasierte, teils empirisch fundierte *Entscheidungsansätze* gegenübergestellt (vgl. Kapitel 3), die jeweils in den Szenarien spezifiziert werden. Die Wohngebäudeeigentümer werden dabei jeweils gemäß einer in den Entscheidungsansätzen definierten Logik vorgegebenen parametrisierten Sanierungsentscheidungsmodellen zugeordnet. Eine zusammenfassende Übersicht der Entscheidungsansätze je Eigentümerstruktur gibt Tabelle 78.

Tabelle 78: Potenzielle Entscheidungsansätze in *AWOHM* je Eigentümerstruktur

Entscheidungsansatzarten (bzw. Sanierungsentscheidungsmodellarten)		Eigentümerstruktur				
		A	B	C	D	E
		Rein selbstnutzender Eigentümer	Selbstnutzende Eigentümergemeinschaften	Amateurvermieter mit teils selbstgenutztem Gebäude	Amateurvermieter mit vollständig vermieteten Gebäuden	Professioneller oder institutioneller Vermieter
Annahmenbasiert	Potenzialakteurstypen	Min CO ₂				
		Min CH ₄				
		Min PM				
		Min NO _x				
		Min SO ₂				
		Min NMVOC				
		Min nicht erneuerbarer Primärenergiebedarf				
		Min Primärenergiebedarf				
		Technischer Kompromiss				
		Max Kapitalwert – Selbstnutzersicht				
	Techno-ökonomischer Kompromiss					
	-			Max Kapitalwert – Vermietersicht		
	-			Max Barwert – Mietersicht		
	Entscheidentypen/-strategien	Ausbesserer			Abbruchstrategie	
		Mindestmaßsanierer			Substanzerhaltungsstrategie Basis	
		Ökonom			Substanzerhaltungsstrategie Erweitert	
		Ökomodernisierer			Langfristige Modernisierungsstrategie	
		-			Ökomodernisierungsstrategie	
		Zufallsziehung Stieß			Zufallsziehung Schätzl	
		Zufallsziehung Selbstnutzer Stengel			Zufallsziehung Vermieter Stengel	
-						
Empirisch fundiert	Modell A und/oder B	Detail	-	-		
		Konsistenz	-	-		

Eine detaillierte Beschreibung der Entscheidungsansätze und der Sanierungsentscheidungsmodelle findet sich in Abschnitt 5.4. In Anbetracht der Variationsmöglichkeiten anderer Szenarioelemente werden bei der (exemplarischen) Modellanwendung in Kapitel 7 nicht alle Entscheidungsansätze verwendet.

5.6.1.3 Aktivierte Module

AWOHHM unterteilt sich in hierarchisch angeordnete, (de)aktivierbare Module. Diese umfassen auf der aggregiertesten Ebene die Gebäudedynamik (vgl. Abschnitt 5.4) und die Haushaltsdynamik (vgl. Abschnitt 5.5). Welche Module (bzw. Teilmodule) bei einem Modelllauf aktiviert bzw. deaktiviert sind, wird in dem jeweiligen Szenario spezifiziert. Die Gebäudedynamik wird weiter unterteilt in Sanierung (vgl. Abschnitt 5.4.1 bis 5.4.4), Neubau (vgl. Abschnitt 5.4.5) und Abbruch (vgl. Abschnitt 5.4.6), die Haushaltsdynamik in Haushaltsveränderung im engeren Sinne (vgl. Abschnitt 5.5.1), Wohnungsmarktwechsel (vgl. Abschnitt 5.5.2) und Wohnungssuche (vgl. Abschnitt 5.5.3). Eine detaillierte Übersicht der (de)aktivierbaren Module gibt Tabelle 79.

Tabelle 79: Übersicht über (de)aktivierbare Module in *AWOHHM*

Aktivierbare Module		
Gebäudedynamik	Sanierung	
	Neubau	
	Abbruch	
Haushaltsdynamik	Haushaltsveränderung im engeren Sinn	Altern
		Sterben
		Einkommensveränderung
		Geburten
		Kinderabzug
		Zusammenlegen
		Teilen
	Wohnungsmarktwechsel	
	Wohnungssuche	

Eine Aktivierung von Modulen verändert die Systemgrenzen der Betrachtung und kann durch die Berücksichtigung weiterer Wechselwirkungen zwischen Gebäude- und Haushaltsdynamik die Aussagekraft der Modellergebnisse in Hinsicht auf die Forschungsfragen erhöhen bzw. deren Beantwortung erst ermöglichen. Allerdings kann die Erweiterung der Systemgrenzen bspw. durch die Aktivierung des Moduls der Wohnungssuche zu einer Erhöhung der Unsicherheit der Modellergebnisse sowie der Modelllaufzeit führen, sodass bei der

Aktivierung der Module je nach Fragestellung inhaltlicher Mehrwert, Unsicherheit und Laufzeit gegeneinander abzuwägen sind. Insbesondere die Sensitivität der Modellergebnisse wie bspw. der Bewertung konkreter Instrumentenbündel gegenüber der Aktivierung von Modulen bzw. deren Sensitivität innerhalb mehrerer Simulationsläufe mit denselben aktivierten Modulen kann für eine derartige Abwägung herangezogen werden.

5.6.1.4 Realisationen von Zufallsvariablen

Bei der Modellierung des Bestands und der Entwicklung von Gebäuden und Haushalten auf Mikroebene wurden basierend auf den zur Verfügung stehenden Daten Verteilungen von Zufallsvariablen definiert, und während der Simulation werden Realisationen aus diesen Verteilungen gezogen. Diese Realisationen (nicht die Verteilungen), die sich während der Modelllaufzeit ergeben, müssen ebenfalls in den Szenarien spezifiziert werden, damit der zu einem Szenario gehörende Modelloutput eindeutig ist. Ein Vergleich der Modellergebnisse für Szenarien, die sich nur in den Realisationen der Zufallsvariablen unterscheiden, ermöglicht die quantitative Analyse der durch den Ansatz der Zufallsziehungen eingebrachten Unsicherheit der Modellergebnisse.

Die Zufallsvariablen werden für die Erzeugung des Gebäudebestands im Startjahr der Simulation sowie für die Simulation von Gebäude- und Haushaltsdynamik eingesetzt. Bei der Erzeugung des Gebäudebestands (vgl. Abschnitt 5.3) werden für jedes Gebäude Baujahr, Gebäudetyp, bereits energetisch modernisierte Gebäudehüllenkomponenten, Wärmeversorgungspaket und Eigentümerstruktur aus z. T. individuellen Wahrscheinlichkeitsverteilungen gezogen. Bei der Simulation der Gebäude- und Haushaltsdynamik werden dem Abbruch (vgl. Abschnitt 5.4.5) und je nach Entscheidungsansatz den Entscheidungstypen bzw. -strategien sowie den Ereignissen Tod, Geburt, Kinderauszug, Zusammenlegen und Teilen von Haushalten sowie Wohnungsmarktwechsel (vgl. Abschnitt 5.5) jeweils Eintrittswahrscheinlichkeiten zugeordnet. Somit werden diese Ereignisse durch die Realisationen der zugehörigen Zufallsvariablen determiniert.

5.6.1.5 Sonstige unsichere Parameter

Neben den durch die Entscheidungsansätze und die mit konkreten Wahrscheinlichkeitsverteilungen hinterlegten Zufallsvariablen eingebrachten Unsicherheiten existieren in *AWOHM* weitere unsichere Parameter, was insbesondere für *Bottom-Up*-Modelle charakteristisch ist (vgl. Kapitel 3). Prinzipiell ist jeder Modellparameter unsicher und könnte als Zufallsvariable modelliert werden. Allerdings sind weder entsprechende Wahrscheinlichkeitsverteilungen noch Abhängigkeiten zwischen diesen hinreichend bekannt. Zudem steigt die Anzahl zu untersuchender Szenarien mit der Anzahl variiertes Parameter und der Anzahl potenzieller Variationen an. Daher wird einerseits auf die Modellierung jedes Modellparameters als Zufallsvariable und andererseits auf die Variation jedes Parameters in Szenarien verzichtet. Stattdessen werden basierend auf subjektiver Einschätzung Modellparameter als *sonstige unsichere Parameter* ausgewählt, die im Rahmen von Szenarien durch exogene Vorgabe variiert werden können. Die Auswahl erfolgt gemäß der Anforderung, dass die Variation der Parameter zu relevanten Änderungen der Modellergebnisse führt. Eine Übersicht gibt Tabelle 80.

Tabelle 80: Sonstige unsichere Parameter in *AWOHM*

Sonstige unsichere Parameter	Variiert in den Szenarien
Anteil des verbleibenden Einkommens bei Renteneintritt [-]	-
Anzahl der Energieerater pro Wohngebäude mit 1-2 Wohneinheiten [-]	-
Auf die Mieter umgelegter Anteil der Modernisierung [-]	X
Außentemperaturen	-
Emissionsfaktoren	-
Energiepreisanstiegserwartung [1 (steigend), 0 (konstant)]	-
Energieträgerpreise	-
Garantiejahre [a]	-
Heizgrenztemperatur [°C]	-
Jährliche Energieeuerungsrate [1/a]	-
Jährlicher Nettoeinkommensanstieg [1/a]	-
Kalkulationszinssatz [1/a]	-
Lebensdauer von Hüllenpaketen [a]	X
Lebensdauer von Wärmeerzeugern [a]	X
Planungshorizont für Energieträgerwechselinvestitionen [a]	-
Planungshorizont für Verrohrungs- und Speicherinvestitionen [a]	-
Primärenergiefaktoren	-
Raumsoltemperatur [°C]	X
Renteneintrittsalter [a]	-
Solarstrahlung	-
Sonstige Parameter	-

Zu den ausgewählten Parametern zählen bspw. Energieträgerpreise, jährliche Energieteuerungsrate, Planungshorizonte und Lebensdauern bzw. die Länge von Sanierungszyklen und der Kalkulationszinssatz. Im Rahmen der Modell-anwendung wurde nicht jeder dieser Parameter variiert.

5.6.2 Unsicherheiten

In diesem Abschnitt werden die Unsicherheiten der Modellergebnisse charakterisiert, auf Unsicherheitstypen zurückgeführt und die Unsicherheitsanalyse in *AWOHH* beschrieben. Der Schwerpunkt der Unsicherheitsanalyse wird auf die Analyse der von anderen Wohngebäudemodellen abweichenden bzw. zusätzlichen Unsicherheiten gesetzt. Diese abweichenden Unsicherheiten werden vor allem durch die Modellierung auf Mikroebene, die integrierte Abbildung von Gebäude, Anlagentechnik und Eigentümer bzw. Bewohner, die Modellierung von Sanierungsentscheidung und Haushaltsdynamik sowie die im Vergleich hohe räumliche Auflösung bedingt.

5.6.2.1 Unsicherheitstypen

In *AWOHH* werden die Unsicherheiten auf strukturelle Parameter, wie bspw. Charakteristika des Gebäudebestands, und vor allem auf Modellergebnisse in Form von Indikatoren bezogen, anhand derer die Bündel umweltpolitischer Instrumente bewertet werden (vgl. Kapitel 6). In der Literatur existieren zahlreiche Unsicherheitstypologien, bspw. von Booth u. a. (2012) speziell in Bezug auf Gebäudebestandsmodelle, von Volk u. a. (2013) in Bezug auf Stoffinventare von Gebäudebeständen bzw. von Draper u. a. (1987) sowie Knetsch (2004) ohne speziellen Fokus auf Gebäude. Da sich Draper u. a. (1987) sowie Knetsch (2004) am stärksten an Modellergebnissen orientieren, werden in Anlehnung an diese im Folgenden die Typen *Datenunsicherheiten* und *Modellunsicherheiten* für *AWOHH* unterschieden¹²⁵. Bereits die Abgrenzung dieser beiden Un-

¹²⁵ Draper u. a. (1987) sowie Knetsch (2004) betrachten zudem noch „Unsicherheiten bez. des zukünftigen Zustands des Systems“. Diese Unsicherheiten werden hier der Datenunsicherheit und der Modellunsicherheit zugeordnet.

sicherheitstypen ist fließend. Eine weitere Differenzierung wie bspw. bei Booth u. a. (2012) sowie Volk u. a. (2013) ist voraussichtlich mit einer niedrigeren Abgrenzbarkeit verbunden und somit für eine anwendungsorientierte Unsicherheitsbetrachtung nicht zweckmäßig.

Betrachtet man die jährlichen Energiekosten im Wohngebäudebestand für Raumwärme und Warmwasser im Startjahr der Simulation als exemplarisches Modellergebnis, werden Daten wie Energieträgerpreise, Raumsolltemperaturen und Wärmedurchgangskoeffizienten für die Berechnung herangezogen. Diese Daten gehen in Modellgleichungen ein, bspw. zunächst in die Berechnung des Energiebedarfs, dann in die Berechnung der Energiekosten eines Gebäudes und damit in die aggregierten Energiekosten für Deutschland. Die angesetzten Energieträgerpreise sind dabei unsicher, da der reale Wert und der angesetzte Wert nicht übereinstimmen müssen. Diese *Datenunsicherheit* spiegelt sich in jedem Modellergebnis wider, in dessen Berechnung die Energieträgerpreise einfließen.

Allerdings entsprechen Modellgleichungen bzw. Berechnungsvorschriften einer Abstraktion von der Realität, bei der bspw. Einflussgrößen wegen eines moderaten Einflusses oder fehlender Daten nicht explizit berücksichtigt werden (können). Die Modellgleichungen bedingen daher *Modellunsicherheiten*. Die oben erwähnte Unsicherheit der Energieträgerpreise kann teilweise auch dadurch erklärt werden, dass kein „realer“ Wert existiert, da die Preise u. a. von der Anschlussleistung oder der geographischen Region abhängen, was in den Modellgleichungen unberücksichtigt bleibt. Somit kann die Unsicherheit der Energieträgerpreise teils den *Datenunsicherheiten* und teils den *Modellunsicherheiten* zugeordnet werden.

5.6.2.2 Unsicherheitsanalyse

Aufgrund der fließenden Übergänge zwischen den Unsicherheitstypen wird im Folgenden auf eine entsprechende Differenzierung der Unsicherheit verzichtet und der Fokus stattdessen auf das Vorgehen bei der Unsicherheitsanalyse in

AWOHM gelegt. Um die Unsicherheiten der Modellergebnisse bei der Ergebnisinterpretation berücksichtigen zu können, werden diese, soweit möglich, quantitativ analysiert. Dazu werden Modellergebnisse, wie in Tabelle 81 dargestellt, entweder mit exogenen Daten oder für unterschiedliche Szenarien verglichen. Durch den Vergleich der Modellergebnisse für unterschiedliche Szenarien kann die Auswirkung ausgewählter Unsicherheiten auf alle Modellergebnisse analysiert werden. Beim Vergleich von Modellergebnissen mit exogenen Daten kann dahingegen die Gesamtunsicherheit der Modellergebnisse im Vergleich zu den exogenen Daten interpretiert werden. Diese Art der Unsicherheitsanalyse kann allerdings nur für Modellergebnisse bzw. Zwischenergebnisse durchgeführt werden, bei denen entsprechende exogene Daten verfügbar sind. Die Unsicherheitsanalyse wird ferner unterteilt in *Unsicherheiten bei der Erzeugung des Startbestands* und *Unsicherheiten bei der Simulation der Bestandsentwicklung*.

Tabelle 81: Übersicht über die Unsicherheitsanalyse in *AWOHM*

Unsicherheiten in Bezug auf die	Vergleich mit exogenen Daten	Vergleich mehrerer Szenarien	
		<i>Monte-Carlo</i> -Simulation	Manuelle Spezifikation von Szenarien
Erzeugung des Startbestands	Gesamtunsicherheit bspw. von Energieverbrauch, Treibhausgas- und Luftschadstoffemissionen sowie Energiekosten	Realisationen der Zufallsvariablen in Bezug auf den Gebäudebestand	Sonstige unsichere Parameter
Simulation der Bestandsentwicklung	Gesamtunsicherheit bspw. in Bezug auf die Entwicklung von Treibhausgas- und Luftschadstoffemissionen	Realisationen von Zufallsvariablen in Bezug auf die Gebäude- und Haushaltsdynamik	Entscheidungsansätze, sonstige unsichere Parameter

Beim Vergleich mehrerer Szenarien werden entweder Realisationen von Zufallsvariablen im Rahmen von *Monte-Carlo*-Simulationen erzeugt oder sonstige unsichere Parameter und Entscheidungsansätze manuell spezifiziert. Der Vergleich von Modellergebnissen und Zwischenergebnissen kann auf unterschiedlichen räumlichen Ebenen, von nationaler Ebene über Bundesländer, Kreise, Gemeindegrößenklassen und Gemeinden bis zur Gebäude-/Haushaltsebene, erfolgen.

Der Schwerpunkt der Unsicherheitsanalyse liegt auf den von anderen Gebäudebestandsmodellen abweichenden Unsicherheiten. Die Modellierung auf Mik-

roebene und die integrierte Abbildung von Gebäude, Anlagentechnik und Eigentümern bzw. Bewohnern erfordert den Einsatz von Zufallsvariablen zur Erzeugung des Gebäude- und Haushaltsstartbestands. Die dadurch verursachte Streuung der Modellergebnisse wird durch die Variation unsicherer Parameter in Szenarien mittels *Monte-Carlo*-Simulation analysiert. Zudem erfolgt ein Abgleich der Modellergebnisse und Zwischenergebnisse mit exogenen Daten, um die Gesamtunsicherheit bzw. Modellgüte abschätzen zu können, bspw. durch den Vergleich berechneter Energiekosten für Raumwärme und Warmwasser mit den im Rahmen des Mikrozensus 2006 auf Haushaltsebene angegebenen Werten.

Die Unsicherheit bei der Modellierung der Sanierungsentscheidung wird teilweise durch die manuelle Variation der Entscheidungsansätze in den Szenarien explizit berücksichtigt. Bei den zufallsziehungsbedingten Unsicherheiten der Gebäude- und Haushaltsdynamik kann ebenfalls die *Monte-Carlo*-Simulation eingesetzt werden, um die Schwankung der Modellaussagen zu charakterisieren. Dies wurde allerdings bei den Modellanwendungen nicht analysiert, da der Schwerpunkt bei der *Monte-Carlo*-Simulation auf die Erstellung des Startbestands gelegt wurde. Die im Vergleich zu anderen Modellen hohe räumliche Auflösung wird durch die Analyse der Unsicherheiten auf unterschiedlichen räumlichen Ebenen in die Unsicherheitsbetrachtung einbezogen. Die quantitative Charakterisierung der Unsicherheiten eines Modellergebnisses erfolgt im Falle der Unsicherheitsanalyse mittels *Monte-Carlo*-Simulation durch die Berechnung von Lage- und Streuparametern der Modellergebnisverteilung. Im Falle der manuellen Variation von Szenarien und dem Vergleich exogener Daten werden individuell angepasste Parameter eingesetzt.

5.6.3 Umweltpolitische Instrumente

In diesem Abschnitt wird die Modellierung umweltpolitischer Instrumente, ihre Spezifikation in Szenarien und ihre Wirkungsweise beschrieben. Abgebildet werden ordnungsrechtliche Instrumente, finanzielle Förderprogramme,

Steuervorschriften und indirekt Informationskampagnen. Jedes umweltpolitische Instrument verfügt über unterschiedliche Intensitätsstufen. Die Intensität kann für jede Simulationsperiode separat gesetzt werden, um die schrittweise Verschärfung umweltpolitischer Instrumente abbilden zu können. Die Gesamtheit aller Instrumente mit ihren jeweiligen Ausprägungen für jede Simulationsperiode wird als Bündel umweltpolitischer Instrumente bezeichnet.

5.6.3.1 Ordnungsrechtliche Instrumente

Die ordnungsrechtlichen Instrumente sind an die Energieeinsparverordnung (EnEV) auf Basis des Energieeinspargesetzes (EnEG) sowie die erste Verordnung zur Durchführung des Bundes-Immissionsschutzgesetzes (1. BImSchV) angelehnt und umfassen Mindestanforderungen hinsichtlich der energetischen Qualität der Gebäudehülle sowie der Qualität der Anlagentechnik (vgl. Kapitel 2). Die EnEV enthält Mindestanforderungen an den Neubau und bei wesentlichen Änderungen von Bauteilen auch an die Sanierung sowie Nachrüstverpflichtungen. Durch die Mindestanforderungen werden die zulässigen, d. h. die legalen Sanierungsvarianten eingeschränkt.

In Bezug auf die *Sanierung der Gebäudehülle* werden bauteilspezifische Mindestanforderungen kombiniert. Bei den bauteilspezifischen Mindestanforderungen werden für den oberen Gebäudeabschluss, für die Außenwände und für den unteren Gebäudeabschluss jeweils die vier Qualitätsstufen +, ++, +++ und ++++ unterschieden. Diese orientieren sich an der EnEV 2007 (Kürzel: +), EnEV 2009 (Kürzel: ++), *EnEV 2009-30%* (Kürzel: +++), und *EnEV 2009-50%* (Kürzel: ++++) (vgl. Tabelle 24). Bei den Fenstern werden (nur) die drei Qualitätsstufen +, +++ und ++++ unterschieden. Wird der Fall, dass für ein Bauteil keine Mindestanforderung gesetzt wird, noch berücksichtigt, so ergeben sich theoretisch $5 * 5 * 5 * 4 = 500$ mögliche Mindestanforderungskombinationen für die Gebäudehülle. Zur Reduktion der Variantenvielfalt werden die fünf in Tabelle 82 dargestellten, aufeinander abgestimmten Mindestanforderungspakete definiert. Die Abbildung im Modell erfolgt derart, dass, falls eine energetische Sanierung eines Bauteils stattfindet, dieses zumin-

dest die Mindestanforderung erfüllen muss. Der Akteur, d. h. der Eigentümer des Gebäudes, hat aber die Möglichkeit, die energetische Sanierung des Bauteils auf legale oder illegale Weise zu umgehen.

Tabelle 82: Mindestanforderungspakete in Bezug auf die Gebäudehülle (Sanierung)

Kürzel für Mindestanforderungspaket in Bezug auf die Gebäudehülle	Mindestanforderung an Qualitätsstufe des Bauteils			
	Oberer Gebäudeabschluss	Außenwände	Unterer Gebäudeabschluss	Fenster
H+	+	+	+	+
H++	++	++	++	+
H+++	+++	+++	+++	+++
H++++	++++	++++	++++	++++

In Bezug auf den *Austausch des Wärmeversorgungspakets* werden Mindestanforderungen an Wärmeerzeuger sowie die Zulässigkeit von Verrohrungen für Raumheizung und Warmwasserversorgung kombiniert. Bei den verbaubaren Wärmeerzeugern werden die drei Qualitätsstufen *, ** und *** unterschieden (vgl. Tabelle 27). Sowohl bei der Raumheizung als auch bei der Warmwasserversorgung kommt jeweils eine zentrale, etagenweise oder dezentrale Verrohrung in Frage. Somit ergeben sich $3 * 2^9 = 1.536$ potenzielle Mindestanforderungskombinationen. Zur Reduktion der Variantenvielfalt werden nur die vier in Tabelle 83 dargestellten Mindestanforderungspakete definiert. Die Abbildung in *AWOHM* erfolgt derart, dass, falls ein Austausch des Wärmeversorgungspakets stattfindet, dieses zumindest die Mindestanforderung erfüllen muss bzw. nur die zulässigen Verrohrungen zur Auswahl stehen.

Tabelle 83: Mindestanforderungspakete in Bezug auf die Wärmeversorgung (Sanierung)

Kürzel für Mindestanforderungspaket in Bezug auf die Wärmeversorgung	Mindestanforderung an Qualitätsstufe Wärmeerzeuger	Zulässigkeit								
		Verrohrung Raumwärme								
		Zentral			Etagenweise			Dezentral		
		Verrohrung Warmwasser								
		Zentral	Etagenweise	Dezentral	Zentral	Etagenweise	Dezentral	Zentral	Etagenweise	Dezentral
W*d	*	X	X	X	X	X	X	X	X	X
W*	*	X	-	-	-	-	-	-	-	-
W**	**	X	-	-	-	-	-	-	-	-
W***	***	X	-	-	-	-	-	-	-	-

Zur Spezifikation von Mindestanforderungspaketen für Gebäudehülle und/oder Wärmeversorgung können die mit Kürzeln versehenen Teilpakete für die

Gebäudehülle und die Wärmeversorgung kombiniert werden. Dabei ergeben sich auf Basis obiger Pakete $4 * 4 = 16$ Kombinationsmöglichkeiten. Zur Reduktion der Variantenvielfalt werden die in Tabelle 84 dargestellten Mindestanforderungspakete definiert. In Anbetracht der Variationsmöglichkeiten anderer umweltpolitischer Instrumente und Szenarioelemente werden bei der (exemplarischen) Modellanwendung in Kapitel 7 nicht alle Mindestanforderungspakete verwendet.

Tabelle 84: Mindestanforderungspakete in Bezug auf Gebäudehülle und Wärmeversorgung (Sanierung)

Kürzel für Mindestanforderungspaket	Mindestanforderungspaket	
	Hüllenpaket	Wärmeversorgung
H+W*d	H+	W*d
H++W*	H++	W*
H+++W*	H+++	W*
H++++W*	H++++	W*
H++++W**	H++++	W**

Beim *Neubau* wird angenommen, dass die Qualität der Gebäudehülle den Mindestanforderungen entspricht. Diese werden gemäß H++, H+++ oder H++++ und, sofern möglich, eine Stufe über den Sanierungsmindestanforderungen gesetzt. Bei den Wärmeversorgungspaketen werden beim Neubau durchweg die höchste Qualitätsstufe und zentrale Verrohrungen gewählt (vgl. hierzu Abschnitt 5.4.6.).

Neben den vordefinierten, sich an EnEV und 1. BImSchV orientierenden Mindestanforderungspaketen werden unter Rückgriff auf multivariate Analysemethoden die Vorteile alternativer Ausgestaltungen analysiert (vgl. Kapitel 6). Hierzu zählt bspw. die Möglichkeit der weiteren Differenzierung der Instrumentenausgestaltung nach Merkmalen wie Gebäudetyp, Baualtersklasse, Energieträger, Anlagentechnik vor dem Austausch und Qualität der Gebäudehülle vor der Sanierung.¹²⁶

¹²⁶ Anforderungen an den Primärenergiebedarf, wie in der EnEV im Falle des Neubaus bzw. einer Vollsanierung, werden in *AWOHHM* nur implizit über Anforderungen an die Komponenten berücksichtigt, da überwiegend von Teilsanierungen ausgegangen wird.

5.6.3.2 Finanzielle Förderprogramme

Die finanziellen Förderprogramme sind angelehnt an das am 31.03.2009 geschlossene CO₂-Gebäudesanierungsprogramm, den Nachfolger „Energieeffizient Sanieren“ und das Marktanreizprogramm „Erneuerbare Energien“ (vgl. Kapitel 2). Diese umfassen bspw. Kredite mit günstigen Konditionen oder Investitionszuschüsse. Modelliert werden die Investitionszuschüsse sowie die Zinsvergünstigungen von Darlehen als Barwert $F_{FF,v,h}$ [€] der Förderung über finanzielle Förderprogramme für die Wärmeerzeuger und die energetische Sanierung der Gebäudehüllenelemente. Da von einem Neubau gemäß den Mindestanforderungen ausgegangen wird, werden bei der Modellierung nur Förderungen bei der Sanierung des Wohngebäudebestands berücksichtigt. Es werden drei Förderintensitäten unterschieden, nämlich keine Förderung (\$), Basis (\$\$) und um 50% erhöhte Fördersätze (\$\$\$). Die konkreten Fördersätze zur Intensität Basis (\$\$) sind in Tabelle 85 für die Gebäudehülle (bezogen auf die energiebedingten Mehrinvestitionen) und die Wärmeerzeuger (bezogen auf die Gesamtinvestitionen) dargestellt. Neben den vordefinierten Förderprogrammen werden unter Rückgriff auf multivariate Analysemethoden die Vorteile alternativer Ausgestaltungen analysiert (vgl. Kapitel 6).

Tabelle 85: Investitionszuschuss [in % der Investition] bei finanziellen Förderprogrammen für den Austausch der Wärmeerzeuger und/oder die Sanierung von Gebäudehüllenelementen (in Anlehnung an: Stengel u. a. 2012; Datengrundlage: Annahmen)

Investitionszuschuss [in % der Investition]			Gebäudehüllenelemente			
Wärmeerzeuger						
*	**	***	+	++	+++	++++
0	5	10	0	5	10	15

5.6.3.3 Steuervorschriften

Bei den Steuervorschriften werden in *AWOHM* die Absetzbarkeit von Investitionen in die energetische Modernisierung von der Einkommensteuer beim selbstnutzenden Eigentümer sowie Energiesteuern unterschieden (vgl. Kapitel 2). Erstere ist angelehnt an den (abgelehnten) Entwurf eines Gesetzes zur steuerlichen Förderung von energetischen Sanierungsmaßnahmen an Wohngebäuden (vgl. CDU/CSU & FDP 2011). Können die Investitionen in die energe-

tische Modernisierung von Wohngebäuden steuerlich geltend gemacht werden, so nimmt dies Einfluss auf die Wirtschaftlichkeit (vgl. Abschnitt 5.4). Bei einer Abschreibung über den Zeitraum T_{ABS} [a] kann die steuerliche Abzugsfähigkeit beim selbstnutzenden Eigentümer als fiktive identische Einzahlung über den Zeitraum T_{ABS} abgebildet werden. Ein etwaiger Anstieg des Haushaltseinkommens wird dabei vernachlässigt. Es gelte in Anlehnung an den Gesetzesentwurf $T_{ABS}=10$ [a]. Der Barwert $F_{ABS,v,h}$ [€] der steuerlichen Absetzbarkeit dieser jährlichen Einzahlung ergibt sich beim Wärmeversorgungspaket v und dem Hüllpaket h auf Basis der energiebedingten Mehrinvestition abzüglich finanzieller Förderungen (ohne Berücksichtigung der steuerlichen Abzugsfähigkeit) $UI_{v,h}$ [€] und des Grenzsteuersatzes¹²⁷ GR_b [-] eines reinen Selbstnutzers b (bzw. des Mittelwerts im Falle selbstnutzender Eigentümergemeinschaften) bei einem Zinssatz i [-] durch

$$F_{ABS,v,h} = \sum_{t=1}^{T_{ABS}} \frac{GR_b * UI_{v,h}}{T_{ABS} * (1+i)^t} \quad (5.106)$$

Für die Gesamtförderung $F_{v,h}$ gelte

$$F_{v,h} = F_{FF,v,h} + F_{ABS,v,h} \quad (5.107)$$

Der Grenzsteuersatz GR_b [-] eines Bewohners bzw. Haushalts b wird ausgehend vom Haushaltsnettoeinkommen EK_b und der Haushaltsgröße HG_b (siehe Abschnitt 5.3.2) geschätzt. Zunächst wird das jährliche Pro-Kopf-Nettoeinkommen PEK_b [€/(Person a)] bestimmt, wobei im Falle von Mehrpersonenhaushalten von zwei Erwachsenen und Ehegattensplitting ausgegangen wird. Aus dem jährlichen Pro-Kopf-Nettoeinkommen wird dann das zu versteuernde Einkommen ZEK_b [€/(Person a)] und der Grenzsteuersatz GR_b [-] abgeschätzt.

¹²⁷ Zur Vereinfachung wird die Unabhängigkeit des Grenzsteuersatzes vom jährlich anrechenbaren Anteil der energiebedingten Mehrinvestition unterstellt. Dadurch wird die Förderung leicht überschätzt.

Als funktionaler Zusammenhang zwischen jährlichem Pro-Kopf-Nettoeinkommen PEK_b und zu versteuerndem Einkommen ZEK_b wird mit dem Grenzsteuersatz GR_b [-] näherungsweise angesetzt:

$$\begin{aligned} PEK_b(ZEK_b) = & ZEK_b - \int_0^{ZEK_b} GR_b(z) dz * (1 + 0,08 + 0,055) - \\ & \min(ZEK_b, 66000) * (0,0995 + 0,015) - \\ & \min(ZEK_b, 44550) * (0,0123 + 0,082) \end{aligned} \quad (5.108)$$

Der Ansatz unterstellt einen gesetzlich krankenversicherten, Kirchensteuer zahlenden, kinderlosen Arbeitnehmer. Dabei beziehen sich Kirchensteuer und Solidaritätszuschlag mit einem Satz von 8%¹²⁸ und 5,5% auf die Einkommensteuer (SolzG 1995)¹²⁹, die sich näherungsweise als Integral des Grenzsteuersatzes GR_b ergibt. Gesetzliche Rentenversicherung und Arbeitslosenversicherung beziehen sich mit Sätzen von 9,95% und 1,5% bei einer Bemessungsgrenze von 66.000 € auf das Bruttoarbeitsentgelt (SGB 2010)¹³⁰. Bruttoarbeitsentgelt und zu versteuerndes Einkommen unterscheiden sich u. a. durch Werbungskosten, Sonderausgaben und Kinderfreibeträge (EStG 2010)¹³¹, was im Rahmen dieser Arbeit vernachlässigt wird. Gesetzliche Krankenversicherung und Pflegeversicherung beziehen sich mit Sätzen von 8,2% und 1,23% bei einer Bemessungsgrenze von 44.550 € ebenfalls auf das Bruttoarbeitsentgelt (SGB 2010). Der Pflegeversicherungssatz enthält hierbei den Aufschlag für Kinderlose. Für den Grenzsteuersatz GR_b gilt in Abhängigkeit vom zu versteuernden Einkommen ZEK_b (berechnet basierend auf §52 Abs. 41 EStG, 2010):

¹²⁸ Aufgrund von Abweichungen zwischen den Bundesländern wurde die Regelung in Baden-Württemberg zur Vereinfachung für alle Bundesländer angesetzt (vgl. Finanzministerium Baden-Württemberg 2010).

¹²⁹ SolzG steht für Solidaritätszuschlaggesetz.

¹³⁰ SGB steht für Sozialgesetzbuch.

¹³¹ EStG steht für Einkommensteuergesetz.

$$GR_b = \begin{cases} 0 & \text{für } ZEK_b \leq 8004 \\ 0,14 + 0,1824 * (ZEK_b - 8004) & \text{für } ZEK_b \in (8004; 13470] \\ 0,2397 + 0,0457 * (ZEK_b - 13470) & \text{für } ZEK_b \in (13470; 52881] \\ 0,42 & \text{für } ZEK_b \in (52881; 250730] \\ 0,45 & \text{für } ZEK_b \in (250730; \infty) \end{cases} \quad (5.109)$$

Aufgrund der strengen Monotonie von $PEK_b(ZEK_b)$ ist die Funktion umkehrbar, und somit zu jedem vorgegebenen jährlichen Pro-Kopf-Nettoeinkommen das zu versteuernde Einkommen und der Grenzsteuersatz eindeutig bestimmbar.

Energiesteuern beeinflussen ebenfalls die Wirtschaftlichkeit energetischer Modernisierungen (vgl. Abschnitt 5.4). Sie werden implizit über die Endenergieträgerpreise P_{et} berücksichtigt (vgl. Tabelle 29). Es werden die drei Intensitäten # (Basis), ## (um 25% erhöhte Energiepreise) und ### (um 50% erhöhte Energiepreise) unterschieden.

5.6.3.4 Informationskampagnen

Die potenzielle Auswirkung von Informationskampagnen wird indirekt durch die Variation der Entscheidungsansätze in Szenarien analysiert. Zudem werden mittels multivariater Analysemethoden auf Basis der Modellergebnisse Zielgruppen (Haushalts- bzw. Gebäudecluster) und zugehörige Emissionsreduktionspotenziale identifiziert, die teilweise durch zielgruppenorientierte Informationskampagnen erschlossen werden können.

6. Bewertung und Analyse

Die Bewertung von Szenarien bzw. das Aufzeigen der Auswirkungen von Bündeln umweltpolitischer Instrumente erfolgt in *AWOHM*, wie in Abschnitt 6.1 erläutert wird, über einen nachhaltigkeitsorientierten Satz von Indikatoren. Dieser ist auf die Sichtweise des Staates ausgerichtet und in eine Nutzwertanalyse eingebettet. In Abschnitt 6.2 wird beschrieben, wie ergänzend dazu, basierend auf den auf Mikroebene, d. h. auf der Ebene konkreter Haushalte und Gebäude, vorliegenden Modellergebnissen mittels multivariater Analyseverfahren Vorschläge für eine Neu- oder Umgestaltung umweltpolitischer Instrumentenbündel abgeleitet werden können.

6.1 Indikatorenbasierte Bewertung aus Staatssicht

Die indikatorenbasierte Bewertung aus Staatssicht basiert auf einem in inhaltlicher Hinsicht hierarchisch untergliederten Satz von Indikatoren, der im Folgenden auch als Indikatorensystem bezeichnet und in Abschnitt 6.1.1 erläutert wird. Unter Rückgriff auf die klassische Nutzwertanalyse als Methode der Mehrzielentscheidungsunterstützung¹³² werden Indikatoren bzw. Teilnutzenwerte ausgehend von einer Basisebene (Ebene 4) über hierarchisch angeordnete Zwischenebenen (Ebenen 3, 2 und 1) zu einem Gesamtnutzenwert (Ebene 0) aggregiert. In Abschnitt 6.1.2 werden Indikatoren der Basisebene zunächst hinsichtlich ihres Berechnungsansatzes typisiert. Anschließend werden in den Abschnitten 6.1.3, 6.1.4 und 6.1.5, differenziert nach den drei der Ebene 1 entsprechenden Dimensionen *Generationengerechtigkeit*, *Lebensqualität* und *sozialer Zusammenhalt*, die Auswahl der Indikatoren, deren mathematische Formulierung auf der Basisebene sowie deren Normierung und Gewichtung erläutert.

¹³² Vgl. *multiattribute value theory* in Belton & Stewart (2003).

6.1.1 Indikatorensystem zur Bewertung aus Staatssicht

Das Indikatorensystem bzw. der Satz von Indikatoren, der zur Bewertung von Szenarien bzw. zum Aufzeigen der Auswirkungen von Bündeln umweltpolitischer Instrumente herangezogen wird, ist auf die im Rahmen dieser Arbeit als Staatssicht bezeichnete Sichtweise von Exekutive, Legislative und Förderer ausgerichtet. Die betrachteten Indikatoren können anhand der Merkmale *Ebene im Indikatorensystem*, *Betrachtungsgegenstand* sowie *Bestandsbezug* charakterisiert werden (vgl. Tabelle 86). Das Indikatorensystem ist in inhaltlicher Hinsicht hierarchisch untergliedert, sodass sich fünf Ebenen ergeben. Mehrere Indikatoren der Ebene n können jeweils zu einem Indikator der Ebene n-1 aggregiert werden. Somit können die Informationen nach entsprechender Normierung sukzessive von Ebene 4 (Basisebene) auf eine einzige Kennzahl auf Ebene 0 (Gesamtindikator) verdichtet werden. Da aber eine einzige Kennzahl der Vielfältigkeit der untersuchten Problemstellung nicht gerecht wird, werden auch untergeordnete Ebenen bzw. Teilbewertungen in der Bewertung explizit analysiert. Bei Umkehrung der Normierung ist auf der Basisebene auch ein Abgleich mit exogenen Referenzwerten möglich. Das Indikatorensystem ist an die zur deutschen Nachhaltigkeitsstrategie (vgl. Bundesregierung 2002) gehörenden Nachhaltigkeitsindikatoren (vgl. Statistisches Bundesamt 2010) angelehnt. Daher wurde basierend auf dem *Indikatorenbericht 2010 - Nachhaltige Entwicklung in Deutschland* (vgl. Statistisches Bundesamt 2010) ein auf den Wohngebäudebestand und dessen Entwicklung angepasster Indikatorenatz definiert. Dabei wurden die Ebenen 1 (Dimensionen) und 2 (Kriterien), sofern passend, übernommen, ggf. angepasst und um Indikatoren auf den Ebenen 3 und 4 (Basisebene) ergänzt. Betrachtungsgegenstände der Indikatoren sind Gebäude oder Haushalte. Aussagen in Bezug auf Gebäudehülle und Wärmeversorgungspakete werden dabei ebenfalls zum Betrachtungsgegenstand Gebäude gezählt. Die Indikatoren beziehen sich entweder auf den Bestand oder die Bestandsveränderung. Neben den drei in Tabelle 86 genannten Merkmalen existieren weitere Möglichkeiten zur Charakterisierung der Indika-

toren. Bspw. können sich Indikatoren auf bestimmte Gruppen der Betrachtungsgegenstände wie Gebäudetypen, Gebäudehüllentypen, Wärmeversorgungspakettypen, Haushaltstypen und Eigentümerstrukturen beschränken.

Tabelle 86: Merkmale und Merkmalsausprägungen für die Charakterisierung der in *AWOHM* zur Bewertung aus Staatssicht verwendeten Indikatoren

Ebene im Indikatorensystem	Betrachtungsgegenstand	Bestandsbezug
Ebene 0 (Gesamtindikator)	Gebäude	Bestand
Ebene 1 (Dimension)	Haushalte	Bestandsveränderung
Ebene 2 (Kriterium)	-	-
Ebene 3	-	-
Ebene 4 (Basisebene)	-	-

Das Indikatorensystem zur Bewertung aus Staatssicht umfasst die drei Dimensionen *Generationengerechtigkeit*, *Lebensqualität* sowie *sozialer Zusammenhalt*, welche ökonomische, ökologische sowie soziale Auswirkungen abdecken. Zur Aggregation wird im Rahmen der klassischen Nutzwertanalyse, einer Methode der Mehrzielentscheidungsunterstützung¹³³, analog zu dem auf Entscheidertypen basierenden Ansatz in Abschnitt 5.4.4 die einfache, sehr transparente, lineare (additive) Aggregation verwendet (vgl. Debreu 1960; Nardo u. a. 2005; Merz 2011). Die Ebenen 1, 2 und 3 des Indikatorensystems sind mit Gewichtungen für die lineare Aggregation der Indikatoren in Tabelle 87 angegeben. Dabei werden alle Indikatoren der Ebene n, die einem Indikator der Ebene n-1 zugeordnet werden, gleichgewichtet¹³⁴. Die Begründung der Indikatorauswahl sowie die formale Beschreibung und Normierung der Indikatoren der Ebene 4 erfolgt in den Abschnitten 6.1.3, 6.1.4 und 6.1.5 differenziert nach den Dimensionen *Generationengerechtigkeit*, *Lebensqualität* und *sozialer Zusammenhalt*. Die Nachhaltigkeitsbewertung wird durch den Betrachtungsgegenstand von *AWOHM*, d. h. den Gebäude- und Haushaltsbestand, und die mit *AWOHM* bereitstellbaren Informationen eingeschränkt, sodass jeweils nur Teilaspekte der Nachhaltigkeit bzw. ihrer Dimensionen und Kriterien abgedeckt werden (können).

¹³³ Vgl. *multiattribute value theory* in Belton & Stewart (2003).

¹³⁴ Bei dem Einsatz von *AWOHM* für konkrete Entscheidungsträger können die Gewichte den jeweiligen Präferenzen entsprechend angepasst werden.

Tabelle 87: Ebene 1, 2 und 3 des in *AWOHH* zur Bewertung aus Staatssicht verwendeten Indikatorensystems (in Anlehnung an: Stengel u. a. 2012; Ebene 1 und 2 in Anlehnung an: Statistisches Bundesamt 2010; Datengrundlage: Annahmen); der Typ der Indikatoren auf Ebene 4 bezieht sich auf die Typisierung in Abschnitt 6.1.2

Ebene 1			Ebene 2			Ebene 3			Typ der Indikatoren auf Ebene 4			
Kürzel	Name	Gewichtung [-]	Kürzel	Name	Gewichtung [-]	Kürzel	Name	Gewichtung [-]				
<i>D₁</i>	Generationsgerechtigkeit	1/3	<i>D₁₁</i>	Ressourcenschonung	0,2	<i>D₁₁₁</i>	Energieeffizienz	1/3	Typ A			
				<i>D₁₁₂</i>		Rohstoffeinsatz	1/3					
			<i>D₁₁₃</i>	Verbrauch fossiler Brennstoffe	1/3							
			<i>D₁₂</i>	Klimaschutz	0,2	<i>D₁₂₁</i>	Treibhausgasemissionen	1				
			<i>D₁₃</i>	Erneuerbare Energien	0,2	<i>D₁₃₁</i>	Erneuerbare Energien	1				
			<i>D₁₄</i>	Staatsverschuldung	0,2	<i>D₁₄₁</i>	Förderbudget	1				
<i>D₂</i>	Lebensqualität	1/3	<i>D₂₁</i>	Wirtschaftl. Wohlstand	0,5	<i>D₂₁₁</i>	Wirtschaftlichkeit der Maßnahmen	1/3	Typ B			
						<i>D₂₁₂</i>	Investitionsbelastung im Bestand	1/3				
						<i>D₂₁₃</i>	Investitionsbelastung im Neubau	1/3				
			<i>D₂₂</i>	Luftqualität	0,5	<i>D₂₂₁</i>	Schadstoffbelastung der Luft	1				
			<i>D₃</i>	Sozialer Zusammenhalt	1/3	<i>D₃₁</i>	Gleichberechtigung	1	<i>D₃₁₁</i>	Einkommensverteilung (nach Wohnen) Selbstnutzer	1/2	Typ C
									<i>D₃₁₂</i>	Einkommensverteilung (nach Wohnen) Mieter	1/2	

6.1.2 Indikatortypisierung auf der Basisebene

In die Berechnung der Indikatoren auf Ebene 4 (Basisebene), die sich zeitlich auf den gesamten *Betrachtungszeitraum (2006 bis 2030)* und räumlich auf ganz *Deutschland (Bund)* beziehen, gehen Modellzwischenergebnisse in unterschiedlichen räumlichen sowie zeitlichen Auflösungen ein und es werden entsprechend räumliche und zeitliche Aggregationen durchgeführt. Diesbezüglich werden drei räumlich-zeitliche Indikatortypen auf der Basisebene (Ebene 4) unterschieden, Typ A, B und C (vgl. auch Tabelle 87). Durch das Vorgehen kann bei der Bewertung berücksichtigt werden, dass bspw. Luftschadstoffemissionen, die lokal wirken, in bestimmten Regionen oder Gemeinden weit über dem räumlichen Mittelwert für Deutschland liegen. Außerdem können

bspw. auch zeitliche Maxima oder Quantile von Emissionen in die Bewertung einfließen.

AWOHM-Zwischenergebnisse beziehen sich auf die in Abbildung 20 dargestellten räumlichen und zeitlichen Auflösungen. Gebäude- und haushaltscharfe Ergebnisse können ausgehend von der Gebäude- und Haushaltsstichprobe auf Mikroebene mittels der im SUF des Mikrozensus 2006 angegebenen Hochrechnungsfaktoren direkt auf die räumliche Auflösung *Bund (Deutschland)* oder zunächst auf die räumliche Zwischenauflösung *Bundesland-Gemeindegroßenklasse*, bspw. Gemeinden mit höchstens 5.000 Einwohnern in Baden-Württemberg, aggregiert werden. In letzterem Falle können die Ergebnisse anschließend, ggf. über die (Zwischen-)Auflösungen *Bundesland* oder *Gemeindegroßenklasse*, auf die Auflösung *Bund (Deutschland)* aggregiert werden. Diese Auflösungen werden als primäre räumliche Auflösungen bezeichnet, da sie ausschließlich auf den räumlichen Differenzierungsmerkmalen des SUF des Mikrozensus 2006 basieren. Durch Kombination der Ergebnisse der Auflösung *Bundesland-Gemeindegroßenklasse* mit Kommunal- und Regionalstatistiken (Statistisches Bundesamt 2008b) können jedoch die sekundären räumlichen Modellauflösungen *Gemeinde* und durch anschließende Aggregation *Kreis* erreicht werden. Diese können wiederum zu Zwischenergebnissen in den primären räumlichen Auflösungen aggregiert werden. Durchweg können dabei unterschiedliche räumliche Aggregationsfunktionen eingesetzt werden. In *AWOHM* angewendet werden, wie weiter unten erläutert, *Summe*, *Mittelwert*, *Maximum* und *Quantil*. Zusammenfassend können Indikatoren der Basisebene mit der Auflösung *Deutschland* über unterschiedliche Zwischenauflösungen, die alle administrativen Ebenen von *Gemeinde* bis *Bund* abdecken, bestimmt werden. Die Unsicherheit der Ergebnisse hängt dabei von den räumlichen Zwischenauflösungen und den verwendeten Aggregationsfunktionen ab.

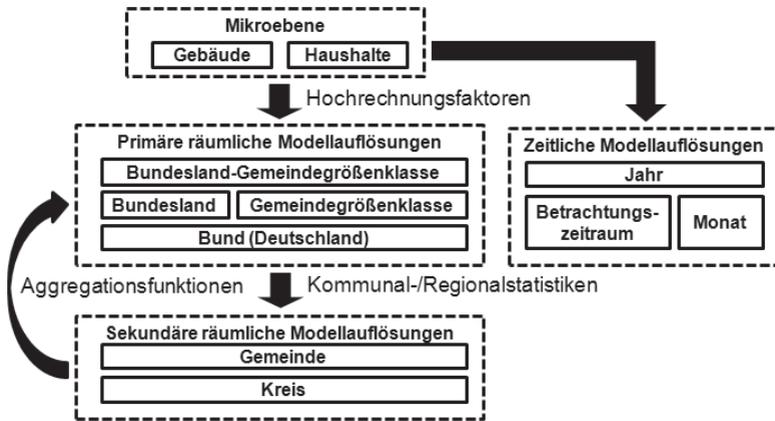


Abbildung 20: Räumliche und zeitliche Auflösungen in AWOHM

Die zeitliche Auflösung der Indikatoren reicht von Monaten über Jahre bis zum gesamten Betrachtungszeitraum. Zunächst werden die Ergebnisse auf Jahresebene bestimmt und können dann entweder nach Monaten¹³⁵ differenziert oder auf den gesamten Betrachtungszeitraum aggregiert werden. Auch hierbei können unterschiedliche Aggregationsfunktionen eingesetzt werden. In AWOHM angewendet werden, wie weiter unten erläutert, *Mittelwert*, *Maximum* und *Endwert*, definiert als Wert zum letzten Zeitpunkt des Betrachtungszeitraums. Zusammenfassend können Indikatoren der Basisebene mit der Auflösung *Betrachtungszeitraum* über unterschiedliche zeitliche Zwischenauflösungen und Aggregationsfunktionen bestimmt werden.

Da zahlreiche Kombinationsmöglichkeiten von räumlichen und zeitlichen Zwischenauflösungen sowie Aggregationen existieren, wurden drei räumlich-zeitliche Typen A, B und C definiert, um die Komplexität zu reduzieren und die Bewertung handhabbar zu machen. Diese Indikatorotypen beziehen sich auf den Berechnungsansatz auf der Basisebene und werden im Folgenden erläu-

¹³⁵ Anhand der monatlichen Heizgradtagverteilung können Energieverbrauchs- und Emissionsverläufe in monatlicher Auflösung berechnet werden. Zur Komplexitätsreduktion wird die monatliche Auflösung im Rahmen der Bewertung jedoch nicht berücksichtigt.

tert. Tabelle 88 fasst für die mathematische Formulierung der Indikatoren notwendige Parameter zusammen, sofern diese in Abschnitt 5.4.3 bzw. insbesondere in Tabelle 44, Tabelle 45, Tabelle 46, Tabelle 47, Tabelle 48 und Tabelle 49 noch nicht spezifiziert wurden. Dabei werden jeweils Quellen oder Verweise auf Abschnitte angegeben, aus denen die betreffenden Größen abgeleitet werden. Da sich die in Abschnitt 5.4.3 bereits spezifizierten Parameter auf einen Zeitpunkt beziehen, im Folgenden aber mehrere Zeitpunkte betrachtet werden, wird diesen teilweise für die folgende Betrachtung ohne erneute Spezifikation ein Zeitindex t hinzugefügt. Begleitend zur folgenden Beschreibung der Indikatorarten werden jeweils weitere Zwischenergebnisbezeichnungen, Gewichtungen und Normierungsfunktionen eingeführt, auf deren Einführung in Tabelle 88 aus Gründen der Übersichtlichkeit verzichtet wurde.

Tabelle 88: Weitere Parameter, die für die formale Spezifikation der Indikatoren zur Bewertung aus Staatssicht benötigt werden

Kürzel	Beschreibung	Quelle oder Verweis
$\#WE_{aw,pg}$	Anzahl an Wohneinheiten einer Gemeinde in Gebäuden mit aw Wohneinheiten im Jahr 2006 (nicht fortgeschrieben) [Wohneinheiten]	Abschnitt 5.3.12
$1HF_{g,t}$	Energetische Modernisierung der Fenster eines Einzelgebäudes in einem Jahr [1 (ja), 0 (nein)]	Kennwerte aus Abschnitt 5.4.3 kombiniert mit der gemäß Abschnitt 5.4.4 simulierten Sanierungsentscheidung
$1HO_{g,t}$	Energetische Modernisierung des oberen Gebäudeabschlusses eines Einzelgebäudes in einem Jahr [1 (ja), 0 (nein)]	
$1HU_{g,t}$	Energetische Modernisierung des unteren Gebäudeabschlusses eines Einzelgebäudes in einem Jahr [1 (ja), 0 (nein)]	
$1HW_{g,t}$	Energetische Modernisierung der Wände eines Einzelgebäudes in einem Jahr [1 (ja), 0 (nein)]	
$1IV_{g,t}$	Austausch des Wärmeversorgungspakets in einem Einzelgebäude in einem Jahr [1 (ja), 0 (nein)]	
$1NB_{g,t}$	Neubau eines Einzelgebäudes in einem Jahr [1 (ja), 0 (nein)]	Abschnitt 5.4.6
A_g	Fläche der Wohnungen eines Einzelgebäudes [m^2]	Abschnitt 5.3.4
$ALH_{b,t}$	Anteil des Leerstands am Hochrechnungsfaktor eines Bewohners in einem Jahr [-]	Abschnitt 5.3.2
$ALH_{g,t}$	Anteil des Leerstands am Hochrechnungsfaktor eines Einzelgebäudes in einem Jahr [-]	Aggregierte Werte der zugehörigen Bewohner (vgl. Abschnitt 5.3.2)
$aw \in AW = \{1, 2, \geq 3\}$	Anzahl der Wohneinheiten eines Gebäudes (1, 2 oder mindestens 3) [Wohneinheiten]	Abschnitt 5.3.12
$B_{g,t} \subseteq B_t$	Bewohner eines Einzelgebäudes in einem Jahr	Fremdschlüssel
$F_{g,t}$	Förderung für ein Einzelgebäude in einem Jahr [€]	Vgl. $1HF_{g,t}$
$G_{aw} \subseteq G$	Einzelgebäude mit aw Wohneinheiten	Einteilung gemäß Eigentümerstruktur bzw. der Anzahl der Wohneinheiten des Einzelgebäudes in Tabelle 18
$G_{ES_A} \subseteq G$	Einzelgebäude mit Eigentümerstruktur A	
$G_{ES_B} \subseteq G$	Einzelgebäude mit Eigentümerstruktur B	
$G_{ES_C} \subseteq G$	Einzelgebäude mit Eigentümerstruktur C	
$G_{ES_D} \subseteq G$	Einzelgebäude mit Eigentümerstruktur D	
$G_{ES_E} \subseteq G$	Einzelgebäude mit Eigentümerstruktur E	
$HRF_{b,t}$	Hochrechnungsfaktor eines Bewohners in einem Jahr [-]	Abschnitt 5.3.2
$HRF_{g,t}$	Hochrechnungsfaktor eines Einzelgebäudes in einem Jahr [-]	Vgl. $ALH_{g,t}$
$i_{g,t}$	Annuität der bis zu einem Jahr in einem Einzelgebäude getätigten Investiti-	Kennwerte aus Abschnitt

Kürzel	Beschreibung	Quelle oder Verweis
	onen abzüglich Förderungen [€/a] $I_{g,t} = \left(\sum_{\tau=\max(1,t-TH)}^t IH_{g,\tau} \cdot \frac{(1+i)^{TH-t}}{(1+i)^{TH-1}} + \left(\sum_{\tau=\max(1,t-TVW)}^t IVW_{g,\tau} \right) \cdot \frac{(1+i)^{TVW-t}}{(1+i)^{TVW-1}} + \left(\sum_{\tau=\max(1,t-TVE)}^t IVE_{g,\tau} \right) \cdot \frac{(1+i)^{TVE-t}}{(1+i)^{TVE-1}} + \left(\sum_{\tau=\max(1,t-TVV)}^t IVV_{g,\tau} \right) \cdot \frac{(1+i)^{TVV-t}}{(1+i)^{TVV-1}} - \left(\sum_{\tau=\max(1,t-\min(TH,TVW,TVE,TVV))}^t F_{g,\tau} \right) \cdot \frac{(1+i)^{\min(TH,TVW,TVE,TVV)-t}}{(1+i)^{\min(TH,TVW,TVE,TVV)-1}} \right)$	5.4.3 kombiniert mit der gemäß Abschnitt 5.4.4 simulierten Sanierungsentscheidung
$I300_{g,t}$	Neubauminvestition für Kostengruppe 300 eines Einzelgebäudes in einem Jahr [€]	Abschnitt 5.4.6
$I420_{g,t}$	Neubauminvestition für Kostengruppe 420 eines Einzelgebäudes in einem Jahr [€]	
$IH_{g,t}$	Energiebedingte Mehrinvestition in die Gebäudehülle eines Einzelgebäudes in einem Jahr [€]	
$IHF_{g,t}$	Energiebedingte Mehrinvestition in die Fenster eines Einzelgebäudes in einem Jahr [€]	
$IHO_{g,t}$	Energiebedingte Mehrinvestition in den oberen Gebäudeabschluss eines Einzelgebäudes in einem Jahr [€]	
$IHU_{g,t}$	Energiebedingte Mehrinvestition in den unteren Gebäudeabschluss eines Einzelgebäudes in einem Jahr [€]	
$IHW_{g,t}$	Energiebedingte Mehrinvestition in die Wände eines Einzelgebäudes in einem Jahr [€]	
$IVE_{g,t}$	Energieträgerwechselinvestition in einem Einzelgebäude in einem Jahr [€]	
$IVV_{g,t}$	Verrohrungs-/Speicherinvestitionen in einem Einzelgebäude in einem Jahr [€]	
$IVW_{g,t}$	Wärmeerzeugerinvestition in einem Einzelgebäude in einem Jahr [€]	
$KM_{w,t}$	Kaltmiete einer Wohnung in einem Jahr [€/Monat]	Abschnitt 5.3.3
pb_{pg}	Bundesland einer Gemeinde	Fremdschlüssel
pgk_{pg}	Gemeindegrößenklasse einer Gemeinde	
SF_{pg}	Siedlungsfläche einer Gemeinde für Wohnzwecke [km ²]	Abschnitt 5.3.12
w_h	Bewohner einer Wohnung	Fremdschlüssel

6.1.2.1 Räumlich-zeitlicher Indikatortyp A

Indikatoren der Basisebene vom Typ A stellen den Indikatortyp mit dem einfachsten räumlich-zeitlichen Aggregationsschema dar (vgl. Abbildung 21). Ein Typvertreter, anhand dessen das Aggregationsschema erläutert wird, sind die CO₂-Emissionen.

Die CO₂-Emissionen $a_{1211,g,t}$ [Tg/a] werden für jedes Jahr des Betrachtungszeitraums auf Mikroebene für jedes Gebäude g basierend auf dessen Wohnfläche A_g [m²] und den vom Hüllenpaket $h_{g,t}$ und dem Wärmeversorgungspaket $v_{g,t}$ abhängenden flächenspezifischen CO₂-Emissionen $\ddot{U}_5(h_{g,t}, v_{g,t})$ [kg/(m² a)] bestimmt.

$$a_{1211,g,t} = \ddot{U}_5(h_{g,t}, v_{g,t}) \cdot A_g \cdot 10^{-9} \tag{6.110}$$

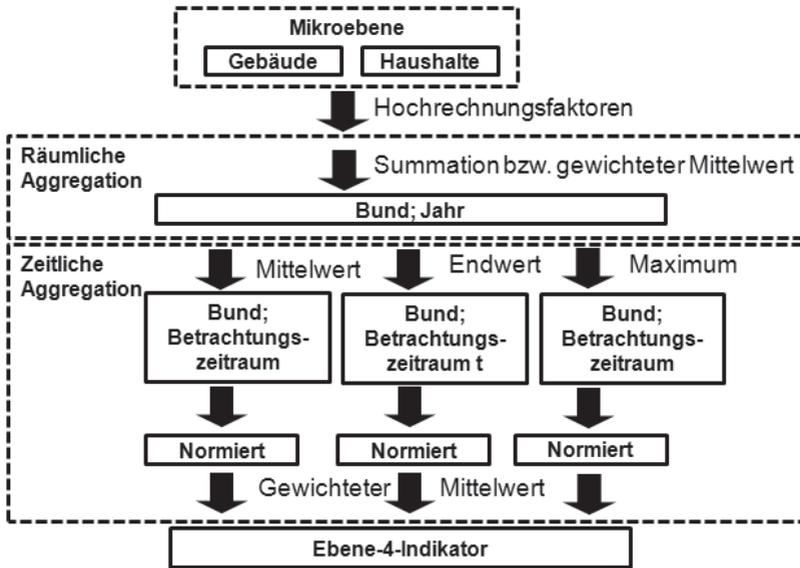


Abbildung 21: Aggregationsschema des räumlich-zeitlichen Indikatortyps A

„1211“ steht hierbei der Reihe nach für die Indikatornummerierungen auf den Ebenen 1 bis 4 der Bewertung aus Staatssicht (vgl. Tabelle 87 für die Ebenen 1 bis 3). Die CO₂-Emissionen entsprechen also dem „ersten Ebene-4-Indikator zum ersten Ebene-3-Indikator zum zweiten Ebene-2-Indikator zum ersten Ebene-1-Indikator“. Auf Ebene 4 werden die CO₂-Emissionen als D_{1211} bezeichnet (vgl. Tabelle 89). Für deren Berechnung sind Zwischenergebnisse wie bspw. $a_{1211,g,t}$ erforderlich. a (bzw. b und c) kennzeichnet dabei die Zugehörigkeit des Zwischenergebnisses zum räumlich-zeitlichen Aggregationstyp A (bzw. B und C). Nach Multiplikation mit dem Hochrechnungsfaktor können unter Berücksichtigung des Leerstands¹³⁶ die CO₂-Emissionen von der Gebäudeebene durch *Summation* auf die Auflösung *Bund* räumlich aggregiert werden.

$$a_{1211,t} = \sum_{g \in G} a_{1211,g,t} * HRF_{g,t} * (1 - ALH_{g,t}/2) \quad (6.111)$$

¹³⁶ Es wird angenommen, dass der Energiebedarf für Raumwärme und Warmwasser im Falle des Leerstands um 50% sinkt.

Somit stehen die CO₂-Emissionen für jedes Jahr der Simulation zur Verfügung. Für die zeitliche Aggregation dieser Werte auf die Auflösung *Betrachtungszeitraum* mit dem Endzeitpunkt T werden jeweils die Aggregationsfunktionen *Mittelwert (MI)*, *Endwert (EW)* und *Maximum (MA)* angewendet.

$$\begin{aligned} a_{1211,MI} &= \frac{1}{T} \sum_{t=1}^T a_{1211,t} \\ a_{1211,EW} &= a_{1211,T} \\ a_{1211,MA} &= \max_{t=1,\dots,T} a_{1211,t} \end{aligned} \quad (6.112)$$

Somit ergeben sich die mittleren jährlichen CO₂-Emissionen, die proportional zur während des Betrachtungszeitraums emittierten Menge an CO₂ sind; die CO₂-Emissionen im letzten Jahr des Betrachtungszeitraums, die den Ausgangswert für die dem Betrachtungszeitraum folgenden Jahre bilden und der Beurteilung der Erreichung langfristiger Ziele dienen; sowie die maximalen CO₂-Emissionen als Extremwert, der insbesondere bei Luftschadstoffen von Bedeutung sein kann. Diese Größen werden ggf. auf eine Bezugsgröße $ref_{1211,t}$, im Falle der CO₂-Emissionen ist diese 1, bezogen, mit der linearen Normierungsfunktion v_{1211} normiert und mit entsprechender Gewichtung der zeitlich unterschiedlich aggregierten CO₂-Emissionen zum Typ-A-Aggregat A_{1211} aggregiert.

$$\begin{aligned} A_{1211} &= w_{1211,MI} * v_{1211} \left(\frac{a_{1211,MI}}{ref_{1211,t}} \right) + w_{1211,EW} * v_{1211} \left(\frac{a_{1211,EW}}{ref_{1211,t}} \right) + \\ &w_{1211,MA} * v_{1211} \left(\frac{a_{1211,MA}}{ref_{1211,t}} \right) \end{aligned} \quad (6.113)$$

Das Typ-A-Aggregat geht bei den räumlich-zeitlichen Aggregationen vom Typ B und C in den Ebene-4-Indikator ein. Beim Typ-A-Indikator wird jedoch keine höhere räumliche Differenzierung betrachtet, da bspw. CO₂-Emissionen nicht überwiegend lokal bzw. regional wirken. Daher entspricht der Ebene-4-Indikator D_{1211} dem Typ-A-Aggregat.

$$D_{1211} = A_{1211} \quad (6.114)$$

Die räumlich-zeitliche Aggregation vom Typ A erfolgt für die übrigen Indikatoren analog, sodass für diese in den Abschnitten 6.1.3, 6.1.4 und 6.1.5 jeweils nur ein Zwischenergebnis formal spezifiziert wird. Die Gewichte $w_{1211,MI}$,

$w_{1211,EW}$ und $w_{1211,MA}$ der zeitlichen Aggregationen werden, auch für die anderen Indikatoren, jeweils auf 1/3 gesetzt.¹³⁷

6.1.2.2 Räumlich-zeitlicher Indikatortyp B

Ebene-4 Indikatoren vom Typ B greifen auf Modellergebnisse mit den räumlichen Auflösungen *Bund*, *Bundesland-Gemeindegrößenklasse* und *Gemeinde* zurück und sind damit komplexer als Indikatoren vom Typ A (vgl. Abbildung 22). Sie werden für Indikatoren der *Luftqualität* bzw. der *Schadstoffbelastung der Luft* eingesetzt. Die höhere räumliche Differenzierung liegt darin begründet, dass die *Schadstoffbelastung der Luft* eine überwiegend lokale bzw. regionale Wirkung hat und im Fokus der Forschungsfragen und Modellanforderungen liegt. Daher wird eine möglichst hohe räumliche Auflösung angestrebt und somit die Gemeindeebene ausgewählt, da für diese (noch) Daten über die Bebauungsstruktur und die Gebietsfläche vorliegen.

Ein Typvertreter, anhand dessen das Aggregationsschema erläutert wird, sind die PM-Emissionen. Die PM-Emissionen $b_{2215,g,t}$ [t/a] werden analog zu den CO₂-Emissionen für jedes Jahr auf Mikroebene für jedes Gebäude g basierend auf dessen Wohnfläche A_g [m²] und den flächenspezifischen PM-Emissionen $\ddot{U}_7(h_{g,t}, v_{g,t})$ [kg/(m² a)] bestimmt.

$$b_{2215,g,t} = \ddot{U}_7(h_{g,t}, v_{g,t}) * A_g * 10^{-3} \quad (6.115)$$

Anschließend werden diese differenziert nach der Gebäudegröße, d. h. der Anzahl aw der Wohneinheiten im Gebäude, durch *Summation* auf die Auflösung *Bundesland-Gemeindegrößenklassen-Kombination* (pb bzw. pgk) aggregiert.

$$b_{2215,pb,pgk,aw,t} = \sum_{g \in G_{pb} \cap G_{pgk} \cap G_{aw}} b_{2215,g,t} * HRF_{g,t} * (1 - ALH_{g,t}/2) \quad (6.116)$$

¹³⁷ Bei dem Einsatz von *AWOHM* für konkrete Entscheidungsträger können die Gewichte den jeweiligen Präferenzen entsprechend angepasst werden.

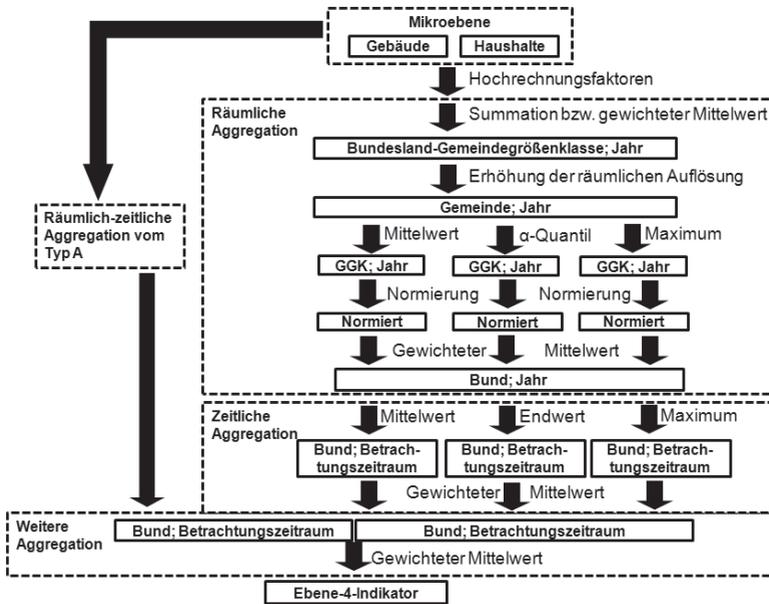


Abbildung 22: Aggregationschema des räumlich-zeitlichen Indikatortyps B; GGK: Gemeindegrößenklasse

Dann werden die PM-Emissionen anhand von Merkmalen je Gemeinde (Gemeindegrößenklasse, Bundesland, Anzahl an Wohneinheiten in Gebäuden mit 1, 2 und mehr als 2 Wohneinheiten) auf Gemeindeebene abgeschätzt und auf eine Referenzgröße $ref_{2215,pg}$, hier die Siedlungsfläche für Wohnzwecke, bezogen.

$$b_{2215,pg,t} = \frac{1}{ref_{2215,pg}} \sum_{aw \in AW} \frac{\#WE_{aw,pg} * b_{2215,pbpg,pgkpg,aw,t}}{\sum_{pgt \in PG_{pbpg} \cap PG_{pgkpg}} \#WE_{aw,pgt}} \quad (6.117)$$

Die resultierenden jährlichen PM-Emissionen [t/(km² a)] mit der Auflösung *Gemeinde* werden dann mit den Aggregationsfunktionen *Mittelwert* (RMI), *Maximum* (RMA) und *α-Quantil* (RQU) räumlich auf *Gemeindegrößenklassen* aggregiert und mittels v_{2215} linear normiert.

$$\begin{aligned}
 B_{2215,RMI,pgk,t} &= v_{2215} \left(\frac{1}{|G_{pgk}|} \sum_{pg \in G_{pgk}} b_{2215,pg,t} \right) & (6.118) \\
 B_{2215,RMA,pgk,t} &= v_{2215} (\max_{pg \in G_{pgk}} b_{2215,pg,t}) \\
 B_{2215,RQU,pgk,t} &= v_{2215} (Q_{\alpha}(\{b_{2215,pg,t} | pg \in G_{pgk}\}))
 \end{aligned}$$

Anschließend erfolgt mit entsprechender Gewichtung der räumlich unterschiedlich aggregierten PM-Emissionen die Aggregation auf die Auflösung *Bund*.

$$\begin{aligned}
 B_{2215,RMI,t} &= \sum_{pgk \in PGK} W_{2215,RMI,pgk} * B_{2215,RMI,pgk,t} & (6.119) \\
 B_{2215,RMA,t} &= \sum_{pgk \in PGK} W_{2215,RMA,pgk} * B_{2215,RMA,pgk,t} \\
 B_{2215,RQU,t} &= \sum_{pgk \in PGK} W_{2215,RQU,pgk} * B_{2215,RQU,pgk,t}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 B_{2215,t} &= W_{2215,RMI} * B_{2215,RMI,t} + W_{2215,RMA} * B_{2215,RMA,t} + \\
 &W_{2215,RQU} * B_{2215,RQU,t} & (6.120)
 \end{aligned}$$

Durch die verwendeten räumlichen Aggregationsfunktionen werden dabei zusätzlich zu der mittleren Belastung (im Sinne von Emissionen¹³⁸) von Gemeinden explizit die höchste (*Maximum*) Belastung und eine hohe Belastung (*α-Quantil*¹³⁹) in die Bewertung mit einbezogen. Die Differenzierung von *Gemeindegrößenklassen* als Zwischenebene der räumlichen Aggregation ist notwendig, da sonst Gemeinden mit höheren Einwohnerzahlen unterrepräsentiert wären. Die jährlichen Emissionen der Auflösung *Bund* werden dann zeitlich aggregiert.

$$\begin{aligned}
 B_{2215,MI} &= \frac{1}{T} \sum_{t=1}^T B_{2215,t} & (6.121) \\
 B_{2215,EW} &= B_{2215,T} \\
 B_{2215,MA} &= \max_{t=1, \dots, T} B_{2215,t}
 \end{aligned}$$

Anschließend erfolgt mit entsprechender Gewichtung der zeitlich unterschiedlich aggregierten PM-Emissionen unter Beibehaltung der räumlichen Auflösung *Bund* die Aggregation auf die zeitliche Auflösung *Betrachtungszeitraum*. Dadurch ergibt sich das Typ-B-Aggregat B_{2215} .

¹³⁸ Die Emissionen anderer Sektoren liegen dem Autor auf Gemeindeebene nicht flächendeckend vor, sodass diese nicht berücksichtigt werden können. Die Betrachtung von Immissionen ist daher nicht zweckmäßig.

¹³⁹ Im Rahmen der Modellanwendung in Kapitel 7 wird α auf 90% gesetzt.

$$B_{2215} = w_{2215,MI} * B_{2215,MI} + w_{2215,EW} * B_{2215,EW} + w_{2215,MA} * B_{2215,MA} \quad (6.122)$$

Analog zu den CO₂-Emissionen wird das Typ-A-Aggregat A_{2215} berechnet. Dieses liegt ebenfalls in den Auflösungen *Betrachtungszeitraum* und *Bund* vor. Die beiden Aggregate werden mit entsprechender Gewichtung zum Ebene-4-Indikator D_{2215} aggregiert.

$$D_{2215} = w_{2215,A} * A_{2215} + w_{2215,B} * B_{2215} \quad (6.123)$$

Die räumlich-zeitliche Aggregation vom Typ B erfolgt für die übrigen Typ-B-Indikatoren analog. Die Gewichte $w_{2215,RMI,pgk}$, $w_{2215,RMA,pgk}$ und $w_{2215,RQU,pgk}$ der räumlich unterschiedlich aggregierten Werte werden jeweils auf $1/|PGK|$ gesetzt. $w_{2215,RMI}$, $w_{2215,RMA}$ und $w_{2215,RQU}$ werden jeweils auf $1/3$ gesetzt. Auch die Gewichte $w_{2215,MI}$, $w_{2215,EW}$ und $w_{2215,MA}$ der zeitlichen Aggregationen werden jeweils auf $1/3$ gesetzt. Die Typ-A- und Typ-B-Aggregate werden über $w_{2215,A}$ und $w_{2215,B}$ jeweils mit $1/2$ gewichtet. Die Gewichte werden für alle Indikatoren analog gesetzt. Die prinzipielle Gleichgewichtung liegt darin begründet, dass diese leicht nachvollziehbar ist und keine belastbaren, davon abweichenden Gewichte verfügbar sind. Bei dem Einsatz von *AWOHM* für konkrete Entscheidungsträger können die Gewichte jedoch den jeweiligen Präferenzen entsprechend angepasst werden.

6.1.2.3 Räumlich-zeitlicher Indikatortyp C

Ebene-4-Indikatoren vom Typ C greifen auf Modellergebnisse mit den räumlichen Auflösungen *Bund* sowie *Bundesland-Gemeindegrößenklasse* zurück und sind damit komplexer als Indikatoren vom Typ A und einfacher als Indikatoren vom Typ B (vgl. Abbildung 23). Sie werden für Indikatoren des *sozialen Zusammenhalts* bzw. der *Einkommensverteilung (nach Wohnen) von Selbstnutzern und Mietern* eingesetzt. Die soziale Dimension und die Verteilung von Lasten liegen im Fokus der Forschungsfragen und Modellanforderungen. Dabei wird im Sinne einer weiterführenden Analyse eine möglichst hohe räumliche Auflösung angestrebt, da sowohl Einkommensverteilungen, Investitionsbedarf in die energetische Modernisierung und Eigentümerstrukturen räumlich und

in Abhängigkeit von der Gemeindegrößenklasse variieren. Da in Bezug auf die *Einkommensverteilung (nach Wohnen)* der Zusammenhang zwischen Gebäude und Bewohner ausschlaggebend ist, wird mit *Bundesland-Gemeindegrößenklasse* die höchste primäre räumliche Auflösung gewählt, aber auf den Schritt zu sekundären Auflösungen wegen fehlender, den Zusammenhang zwischen Gebäude und Bewohner spezifizierender, Daten auf Gemeinde- und Kreisebene verzichtet.

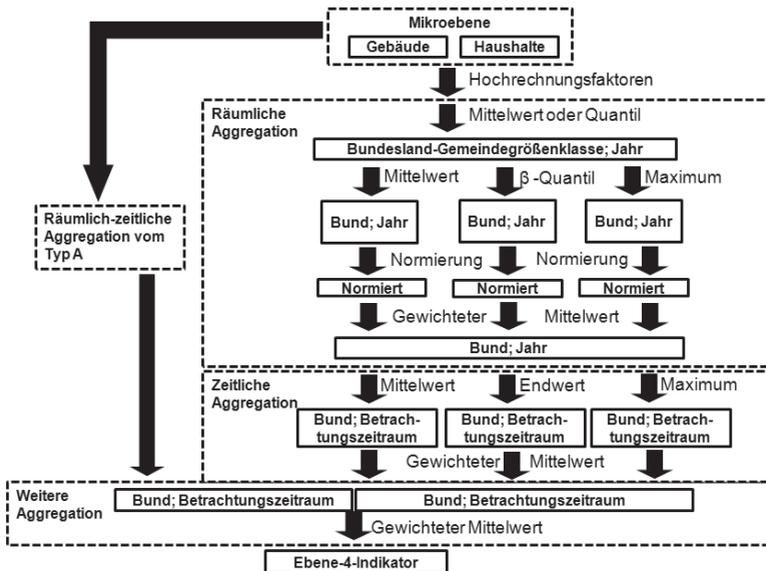


Abbildung 23: Aggregationsschema des räumlich-zeitlichen Indikator Typs C

Ein Typvertreter, anhand dessen das Aggregationsschema erläutert wird, ist das mittlere verfügbare Einkommen von Mietern abzüglich Energiekosten für Raumwärme und WW sowie Kaltmiete [€/ (Monat Person)]. Dieses wird zunächst auf Mikroebene für alle Haushalte b basierend auf deren Haushaltsnettoeinkommen $EK_{b,t}$ [€/Monat], Wohnfläche $A_{w_{b,t}}$ [m²], Kaltmiete $KM_{w_{b,t,t}}$ [€/Monat], Haushaltsgröße $HG_{b,t}$ [Personen] und Energiekosten \ddot{O}_3 [€/ (m² a)] berechnet.

$$C_{3121,b,t} = \frac{EK_{b,t} - \ddot{O}_3 \left(\iota_{g_{b,t,t}} \nu_{g_{b,t,t}} \right)^* \frac{AW_{b,t} - KM_{w_{b,t,t}}}{12}}{HG_{b,t}} \quad (6.124)$$

Anschließend wird für die räumliche Auflösung *Bundesland-Gemeindegrößenklasse* (pb bzw. pgk) der mit den Hochrechnungsfaktoren unter Berücksichtigung des Leerstands gewichtete Mittelwert bestimmt.

$$C_{3121,pb,pgk,t} = \frac{\sum_{b \in B_{MIET,t} \cap B_{pb,pgk,t}} C_{3121,b,t} * HRF_{b,t} * (1 - ALH_{b,t})}{\sum_{b \in B_{MIET,t} \cap B_{pb,pgk,t}} HRF_{b,t} * (1 - ALH_{b,t})} \quad (6.125)$$

Mit den räumlichen Aggregationsfunktionen Mittelwert (RMI), Maximum (RMA) und β -Quantil¹⁴⁰ (RQU) wird $C_{3121,pb,pgk,t}$ jeweils auf die räumliche Auflösung Bund aggregiert und normiert.

$$C_{3121,RMI,t} = v_{3121} \left(\frac{\sum_{pb \in PB} \sum_{pgk \in PGK} C_{3121,pb,pgk,t}}{\sum_{pb \in PB} \sum_{pgk \in PGK} \text{sgn}(C_{3121,pb,pgk,t})} \right) \quad (6.126)$$

$$C_{3121,RMA,t} = v_{3121} \left(\max_{pb \in B} \max_{pgk \in PGK} C_{3121,pb,pgk,t} \right)$$

$$C_{3121,RQU,t} = v_{3121} (Q_\beta (\{ c_{3121,pb,pgk,t} | pb \in PB, pgk \in PGK \}))$$

Anschließend erfolgt mit entsprechender Gewichtung der räumlich unterschiedlich aggregierten mittleren Einkommen die Aggregation zu $C_{3121,t}$.

$$C_{3121,t} = w_{3121,RMI} * C_{3121,RMI,t} + w_{3121,RMA} * C_{3121,RMA,t} + w_{3121,RQU,t} * C_{3121,RQU,t} \quad (6.127)$$

Die jährlichen mittleren Einkommen der Auflösung *Bund* werden dann zeitlich aggregiert.

$$C_{3121,MI} = \frac{1}{T} \sum_{t=1}^T C_{3121,t} \quad (6.128)$$

$$C_{3121,EW} = C_{3121,T}$$

$$C_{3121,MA} = \max_{t=1, \dots, T} C_{3121,t}$$

Das Typ-C-Aggregat C_{3121} ergibt sich mit entsprechender Gewichtung der zeitlich unterschiedlich aggregierten mittleren Einkommen.

$$C_{3121} = w_{3121,MI} * C_{3121,MI} + w_{3121,EW} * C_{3121,EW} + w_{3121,MA} * C_{3121,MA} \quad (6.129)$$

Zudem wird das Typ-A-Aggregat A_{3121} berechnet. Die beiden Aggregate werden mit entsprechender Gewichtung zum Ebene-4-Indikator D_{3121} aggregiert.

$$D_{3121} = w_{3121,A} * A_{2215} + w_{3121,C} * C_{3121} \quad (6.130)$$

¹⁴⁰ Im Rahmen der Modellanwendung in Kapitel 7 wird β auf 20% gesetzt.

Die räumlich-zeitliche Aggregation vom Typ C erfolgt für die übrigen Typ-C-Indikatoren analog. Die Gewichte $w_{3121,RMI}$, $w_{3121,RMA}$ und $w_{3121,RQU}$ der räumlich unterschiedlich aggregierten Werte werden jeweils auf 1/3 gesetzt. Die Gewichte $w_{3121,MI}$, $w_{3121,EW}$ und $w_{3121,MA}$ der zeitlichen Aggregationen werden auch jeweils auf 1/3 gesetzt. Die Typ-A- und Typ-C-Aggregate werden über $w_{3121,A}$ und $w_{3121,C}$ jeweils mit 1/2 gewichtet. Die Gewichte werden für alle Indikatoren analog gesetzt. Die prinzipielle Gleichgewichtung liegt wiederum darin begründet, dass diese leicht nachvollziehbar ist und keine belastbaren, davon abweichenden Gewichte verfügbar sind. Bei dem Einsatz von *AWOHM* für konkrete Entscheidungsträger können die Gewichte jedoch den jeweiligen Präferenzen entsprechend angepasst werden.

6.1.3 Generationengerechtigkeit

Tabelle 89 gibt eine Übersicht über die Indikatoren der Dimension *Generationengerechtigkeit*¹⁴¹, deren Gewichtungen für eine lineare Aggregation von Ebene 4 zu Ebene 3 sowie deren für eine lineare Normierung herangezogenen Ober- und Untergrenzen. Zudem werden die Indikatoren gemäß den Merkmalen Bestandsbezug und Betrachtungsgegenstand charakterisiert. Prinzipiell erfolgt auch auf Ebene 4 eine Gleichgewichtung der Indikatoren, von der aber in begründeten Einzelfällen abgewichen wird. Im Folgenden wird die Auswahl dieser Indikatoren sowie deren Normierung erläutert und deren Berechnung basierend auf dem entwickelten Wohngebäude- und Haushaltsmodell formal spezifiziert.

¹⁴¹ Die Nachhaltigkeitsbewertung wird durch den Betrachtungsgegenstand von *AWOHM*, d. h. den Gebäude- und Haushaltsbestand, und die mit *AWOHM* bereitstellbaren Informationen eingeschränkt, sodass jeweils nur Teilaspekte der Nachhaltigkeit bzw. ihrer Dimensionen und Kriterien abgedeckt werden (können).

Tabelle 89: Staatsrichtindikatoren der Dimension *Generatortengerechtigkeit* (in Anlehnung an: Stengel u. a. 2012; Ebene 2 in Anlehnung an: Statistisches Bundesamt 2010; Datengrundlage: Annahmen bzw. eigene Berechnungen); B: Bestand; BB: Bestandsbezug; BG: Betrachtungsgegenstand; G: Gebäude; V: Bestandsveränderung

Ebene 2	Ebene 3	Kürzel	Ebene 4 Name	Gewichtung	Einheit vor der Normierung	Normierungsfunktion		Steigend	BB	BG	
						Untere Grenze	Obere Grenze				
Ressourcen- schonung	Energieeffizienz	D111	Energetische Vollsanierungsrate	4/20	m ² /m ²	0,000	0,029	1	V	G	
			D112	Energetische Anlagentechniksanierungsrate	4/20	m ² /m ²	0,027	0,039	1	V	G
			D113	Anteil EnEV09-50%-Hülle an allen sanierten Hüllen	4/20	m ² /m ²	0	1	1	V	G
			D114	Anteil EnEV09-30%-Hülle an allen sanierten Hüllen	3/20	m ² /m ²	0	1	1	V	G
			D115	Anteil EnEV09-Hülle an allen sanierten Hüllen	1/20	m ² /m ²	0	1	1	V	G
			D116	Anteil EnEV07-Hülle an allen sanierten Hüllen	0	m ² /m ²	0	1	1	V	G
			D117	Wohnflächenspezifischer Endergiebedarf	4/20	kWh/(m ² a)	89	174	0	B	G
			D118	Gesamtpriñarenergiebedarf (inkl. erneuerbare Energien)	1/6	El/a	1,7	3,1	0	B	G
			D119	Dämmstoffersatz Sanierung	1/6	Mrd. €/a	0,0	12,4	0	V	G
			D120	Fenster Sanierung (energiebedingte Mehrinvestition)	1/6	Mrd. €/a	0,0	3,6	0	V	G
			D121	Anlagentechnik Sanierung	1/6	Mrd. €/a	4,7	49,0	0	V	G
			D122	Anlagentechnik Neubau	1/6	Mrd. €/a	0,6	1,7	0	V	G
			D123	Baustoffe Neubau	1/6	Mrd. €/a	8,0	22,1	0	V	G
			D124	Endergiebedarf Gas	1/6	El/a	0,19	1,15	0	B	G
			D125	Endergiebedarf Öl	1/6	El/a	0,08	0,78	0	B	G
			D126	Endergiebedarf Strom	1/6	El/a	0,06	0,12	0	B	G
			D127	Endergiebedarf Braunkohle	1/6	El/a	0,01	0,02	0	B	G
D128	Endergiebedarf Steinkohle	1/6	El/a	0,00	0,01	0	B	G			
D129	Endergiebedarf Fernwärme	1/6	El/a	0,19	0	0	B	G			
D130	Endergiebedarf (inkl. Biomasse)	49/100	Tg/a	66	130	0	B	G			
D131	CO ₂ -Emissionen (inkl. Biomasse)	49/100	Tg/a	18	121	0	B	G			
D132	CH ₄ -Emissionen	2/100	Gg/a	3	15	0	B	G			
D133	CH ₄ -Emissionen	1/2	kWh/kWh	0,06	1,09	0	B	G			
D134	Anteil Holz ua. erneuerbare Energien am Endergiebedarf	1/2	El/a	0,04	0,04	1	B	G			
D135	Ausgaben Förderung Hülle und Anlagentechnik	1/3	Mrd. €/a	0,0	2,8	0	V	G			
D136	Professionelle oder institutionelle Vermierer	1/3	Mrd. €/a	1,5	20,5	1	V	G			
D137	Amateurvermieter	1/3	Mrd. €/a	2,1	26,9	1	V	G			
D138	Selbstnutzende Eigentümer	1/3	Mrd. €/a	2,1	26,9	1	V	G			
D1521	Investitionen Neubau	1	Mrd. €/a	8,6	23,8	1	V	G			

6.1.3.1 Erläuterungen zur Indikatoreauswahl

Für das Kriterium *Ressourcenschonung* wurden die auf alle Sektoren abzielenden Nachhaltigkeitsindikatoren Energieproduktivität, Primärenergieverbrauch und Rohstoffproduktivität (vgl. Statistisches Bundesamt 2010) auf den Wohngebäudebestand und dessen Entwicklung übertragen. Die daraus resultierenden Ebene-3-Indikatoren *Energieeffizienz*, *Rohstoffeinsatz* und *Verbrauch fossiler Brennstoffe* werden durch die Ebene-4-Indikatoren weiter untergliedert, um einerseits das Zustandekommen der Ebene-3-Indikatoren transparent und strukturiert darzustellen und andererseits tiefergehende Analysen zu ermöglichen. Diese weitere Differenzierung ermöglicht insbesondere Rückschlüsse für veränderte Ausgestaltungen der umweltpolitischen Instrumente. Für den Indikator *Energieeffizienz* werden bspw. neben dem effizienzausdrückenden *wohnflächenspezifischen Endenergiebedarf* die *energetische Voll- und Anlagentechniksanierrate* sowie die Anteile der unterschiedlichen Qualitätsstufen sanierter Gebäudehüllen betrachtet. Dadurch können Energieeffizienzentwicklungen auf unterschiedliche Implementierungsraten und/oder Qualitätsstufen energetischer Modernisierungsmaßnahmen zurückgeführt werden.¹⁴² Somit können Änderungen der umweltpolitischen Instrumente wie die Notwendigkeit eines ordnungsrechtlichen Vollzugs oder der Verkürzung von Sanierungszyklen, eine Erhöhung von Investitionszuschüssen oder eine Verschärfung der Mindestanforderungen priorisiert werden. Für den Indikator *Rohstoffeinsatz* ermöglicht eine Differenzierung in Dämmstoffe, Fenster und Anlagentechnik, Energie bzw. Neubau oder Sanierung eine Priorisierung der Relevanz vorgelagerter Effizienzsteigerungsmaßnahmen. Für den Indikator *Verbrauch fossiler Brennstoffe* werden einzelne Energieträger differenziert, um Energieträgersubstitutionen aufzuzeigen sowie die Not-

¹⁴² Die Gewichte wurden (abweichend von der prinzipiellen Gleichgewichtung) derart gewählt, dass höhere Qualitätsstufen *ceteris paribus* zu einer höheren *Energieeffizienz* führen (vgl. Tabelle 89).

wendigkeit und Wirksamkeit von auf Energieträgersubstitution abzielenden Instrumenten analysieren zu können.

Für das Kriterium *Klimaschutz* werden bei *Treibhausgasemissionen* Emissionen¹⁴³ an CO₂ inklusive und exklusive Biomasse sowie CH₄-Emissionen differenziert. Dadurch können Energieträgersubstitutionen zu Biomasse sowie der Wechsel zu Wärmeerzeugern mit höheren CH₄-Emissionen, wie bspw. Gasbrennwertkesseln (vgl. Struschka u. a. 2008), separat analysiert werden.¹⁴⁴ Für das Kriterium und den Ebene-3-Indikator *erneuerbare Energien* wird neben dem Anteil der erneuerbaren Energien am Endenergiebedarf (vgl. Statistisches Bundesamt 2010) auch der gesamte Endenergiebedarf an erneuerbaren Energien betrachtet, da insbesondere Holzpellets- und -hackschnitzel nur in begrenzter Menge zur Verfügung stehen. Das Kriterium *Staatsverschuldung* umfasst im Bereich Wohngebäude das für Förderungen von Gebäudehülle und Anlagentechnik verwendete Förderbudget. Als Bestandteil des Kriteriums *wirtschaftliche Zukunftsvorsorge* werden die Energieeffizienzinvestitionen¹⁴⁵ (bzw. Investitionen in erneuerbare Energien) in den Wohngebäudebestand sowie die Investitionen in Neubauten differenziert. Insbesondere die Bestandsinvestitionen werden dabei durch die umweltpolitischen Instrumente beeinflusst, wobei die Verteilung der Investitionen auf die Eigentümerstrukturen bei der Umgestaltung von Instrumenten mittels der Indikatoren berücksichtigt werden kann.

¹⁴³ Vgl. Fußnote 187 und Abschnitt 8.2 bez. indirekter Emissionen. Diese werden in *AWOHM* nicht berücksichtigt.

¹⁴⁴ Die CH₄-Emissionen sind aufgrund eines *Global Warming Potential* 100 von 21 (IINAS 2013) und einer Emissionsmenge von ca. 2/10.000 der CO₂-Emissionen (Umweltbundesamt 2012a) von untergeordneter Bedeutung. Daher wurden die Gewichte (abweichend von der prinzipiellen Gleichgewichtung) derart gewählt, dass CO₂-Emissionen die Bewertung dominieren, aber Entwicklungspfade mit niedrigeren CH₄-Emissionen *ceteris paribus* hinsichtlich *Klimaschutz* besser bewertet werden (vgl. Tabelle 89).

¹⁴⁵ Bei der Gebäudehülle wurde die energiebedingte Mehrinvestition und bei der Anlagentechnik die Gesamtinvestition angesetzt.

6.1.3.2 Formale Spezifikation

Die Ebene-4-Indikatoren der Dimension *Generationengerechtigkeit* sind ausschließlich vom räumlich-zeitlichen Typ A und werden entsprechend aggregiert. Im Folgenden werden daher als formale Spezifikation jeweils nur Zwischenergebnisse für den Einstieg in das in Abschnitt 6.1.2 erläuterte Aggregationsschema angegeben.

(D₁₁₁₁) Energetische Vollsaniierungsrate [m²/m²]:

$$\begin{aligned} a_{1111,t} &= \sum_{g \in G} \frac{1HO_{g,t} + 1HW_{g,t} + 1HF_{g,t} + 1HU_{g,t}}{4} * A_g * HRF_{g,t} \\ ref_{1111,t} &= \sum_{g \in G} HRF_{g,t} * A_g \end{aligned} \quad (6.131)$$

(D₁₁₁₂) Energetische Anlagentechniksaniierungsrate [m²/m²]:

$$\begin{aligned} a_{1112,t} &= \sum_{g \in G} 1IV_{g,t} * A_g * HRF_{g,t} \\ ref_{1112,t} &= \sum_{g \in G} HRF_{g,t} * A_g \end{aligned} \quad (6.132)$$

(D₁₁₁₃) Anteil EnEV09-50%-Hülle an allen sanierten Hüllen [m²/m²]:

$$\begin{aligned} a_{1113,t} &= \sum_{g \in G} \left(floor\left(\frac{QS_{ho_{h,g,t}}}{11}\right) * 1HO_{g,t} + floor\left(\frac{QS_{hw_{h,g,t}}}{11}\right) * \right. \\ & \quad \left. 1HW_{g,t} + floor\left(\frac{QS_{hu_{h,g,t}}}{11}\right) * 1HU_{g,t} + floor\left(\frac{QS_{hf_{h,g,t}}}{11}\right) * \right. \\ & \quad \left. 1HW_{g,t} \right) / 4 * A_g * HRF_{g,t} \\ ref_{1113,t} &= a_{1111,t} \end{aligned} \quad (6.133)$$

(D₁₁₁₄) Anteil EnEV09-30%-Hülle an allen sanierten Hüllen [m²/m²]:

$$\begin{aligned} a_{1114,t} &= \sum_{g \in G} \left(floor\left(\frac{QS_{ho_{h,g,t}}}{10}\right) * 1HO_{g,t} + floor\left(\frac{QS_{hw_{h,g,t}}}{10}\right) * \right. \\ & \quad \left. 1HW_{g,t} + floor\left(\frac{QS_{hu_{h,g,t}}}{10}\right) * 1HU_{g,t} + floor\left(\frac{QS_{hf_{h,g,t}}}{10}\right) * \right. \\ & \quad \left. 1HW_{g,t} \right) / 4 * A_g * HRF_{g,t} - a_{1113,t} \\ ref_{1114,t} &= a_{1111,t} \end{aligned} \quad (6.134)$$

(D₁₁₁₅) Anteil EnEV09-Hülle an allen sanierten Hüllen [m²/m²]:

$$\begin{aligned} a_{1115,t} &= \sum_{g \in G} \left(floor\left(\frac{QS_{ho_{h,g,t}}}{9}\right) * 1HO_{g,t} + floor\left(\frac{QS_{hw_{h,g,t}}}{9}\right) * \right. \\ & \quad \left. 1HW_{g,t} + floor\left(\frac{QS_{hu_{h,g,t}}}{9}\right) * 1HU_{g,t} + floor\left(\frac{QS_{hf_{h,g,t}}}{9}\right) * \right. \\ & \quad \left. 1HW_{g,t} \right) / 4 * A_g * HRF_{g,t} - a_{1114,t} - a_{1113,t} \\ ref_{1115,t} &= a_{1111,t} \end{aligned} \quad (6.135)$$

(D₁₁₁₆) Anteil EnEV07-Hülle an allen sanierten Hüllen [m²/m²]:

$$\begin{aligned} a_{1116,t} &= a_{1111,t} - a_{1113,t} - a_{1114,t} - a_{1115,t} \\ ref_{1116,t} &= a_{1111,t} \end{aligned} \quad (6.136)$$

(D₁₁₁₇) Wohnflächenspezifischer Endenergiebedarf [kWh/(m² a)]:

$$\begin{aligned} a_{1117,g,t} &= \ddot{U}_1(h_{g,t}, v_{g,t}) * A_g \\ ref_{1117,t} &= \sum_{g \in G} HRF_{g,t} * A_g \end{aligned} \quad (6.137)$$

(D₁₁₂₁) Gesamtprimärenergiebedarf (inkl. erneuerbare Energien) [EJ/a]:

$$\begin{aligned} a_{1121,g,t} &= \ddot{U}_4(h_{g,t}, v_{g,t}) * A_g * 3600 * 10^{-15} \\ ref_{1121,t} &= 1 \end{aligned} \quad (6.138)$$

(D₁₁₂₂) Dämmstoffeinsatz Sanierung [Mrd. €/a]:

$$\begin{aligned} a_{1122,t} &= \sum_{g \in G} HRF_{g,t} * (IHO_{g,t} + IHW_{g,t} + IHU_{g,t}) * 10^{-9} \\ ref_{1122,t} &= 1 \end{aligned} \quad (6.139)$$

(D₁₁₂₃) Fenster Sanierung (energiebedingte Mehrinvestition) [Mrd. €/a]:

$$\begin{aligned} a_{1123,t} &= \sum_{g \in G} HRF_{g,t} * IHF_{g,t} * 10^{-9} \\ ref_{1123,t} &= 1 \end{aligned} \quad (6.140)$$

(D₁₁₂₄) Anlagentechnik Sanierung [Mrd. €/a] (Gesamtinvestition):

$$\begin{aligned} a_{1124,t} &= \sum_{g \in G} HRF_{g,t} * [IVW_{g,t} + IVE_{g,t} + IVV_{g,t}] * 10^{-9} \\ ref_{1124,t} &= 1 \end{aligned} \quad (6.141)$$

(D₁₁₂₅) Anlagentechnik Neubau [Mrd. €/a]:

$$\begin{aligned} a_{1125,t} &= \sum_{g \in G} HRF_{g,t} * I420_{g,t} * 10^{-9} \\ ref_{1125,t} &= 1 \end{aligned} \quad (6.142)$$

(D₁₁₂₆) Baustoffe Neubau [Mrd. €/a]:

$$\begin{aligned} a_{1126,t} &= \sum_{g \in G} HRF_{g,t} * I300_{g,t} * 10^{-9} \\ ref_{1126,t} &= 1 \end{aligned} \quad (6.143)$$

(D₁₁₃₁₋₁₁₃₆) Endenergiebedarf Gas, Öl, Strom, Braunkohle, Steinkohle, Fernwärme [EJ/a]: (*x* und *et* müssen entsprechend gesetzt werden)

$$\begin{aligned} a_{113x,g,t} &= \ddot{U}_{1,et}(h_{g,t}, v_{g,t}) * A_g * 3600 * 10^{-15} \\ ref_{113x,t} &= 1 \end{aligned} \quad (6.144)$$

(D₁₂₁₁) CO₂-Emissionen (inkl. Biomasse) [Tg/a]: Siehe Abschnitt 6.1.2

(D₁₂₁₂) CO₂-Emissionen (exkl. Biomasse) [Tg/a]:

$$a_{1212,g,t} = \sum_{vw \in VW} v_{g,t} \sum_{et \in ET} \frac{EF_{vw,CO_2,exkl. Biomasse}}{\eta_{vw}} * \left[\frac{DA_{RAUM,vw} * Q_{RAUM,h,g,t}}{\eta_{vsRAUM,v,g,t}} + \frac{DA_{WASSER,vw} * Q_{WASSER,g,t}}{\eta_{vsWASSER,v,g,t}} \right] * 10^{-9} \quad (6.145)$$

$$ref_{1212,t} = 1$$

(D₁₂₁₃) CH₄-Emissionen [Gg/a]:

$$a_{1213,g,t} = \ddot{U}_6(h_{g,t}, v_{g,t}) * A_g * 10^{-6} \quad (6.146)$$

$$ref_{1213,t} = 1$$

(D₁₃₁₁) Endenergiebedarf Holz u.a. erneuerbare Energien [EJ/a]:

$$a_{1311,g,t} = \sum_{et \in EET} \ddot{U}_{1,et}(h_{g,t}, v_{g,t}) * A_g * 3600 * 10^{-15} \quad (6.147)$$

$$ref_{1311,t} = 1$$

(D₁₃₁₂) Anteil Holz u.a. erneuerbare Energien am Endenergiebedarf [kWh/kWh]:

$$a_{1312,t} = \sum_{g \in G} \sum_{et \in EET} \ddot{U}_{1,et}(h_{g,t}, v_{g,t}) * A_g * (1 - ALH_{g,t}/2) \quad (6.148)$$

$$ref_{1312,t} = \sum_{g \in G} \sum_{et \in EET} \ddot{U}_{1,et}(h_{g,t}, v_{g,t}) * A_g * (1 - ALH_{g,t}/2)$$

(D₁₄₁₁) Ausgaben Förderung Hülle und Anlagentechnik [Mrd. €/a]:

$$a_{1411,t} = \sum_{g \in G} HRF_{g,t} * F_{g,t} * 10^{-9} \quad (6.149)$$

$$ref_{1411,t} = 1$$

(D₁₅₁₁) Energieeffizienzinvestitionen im Bestand¹⁴⁶ – Professionelle oder institutionelle Vermieter [Mrd. €/a]:

$$a_{1511,t} = \sum_{g \in G_{ESE}} HRF_{g,t} * [IH_{g,t} + IVW_{g,t} + IVE_{g,t} + IVV_{g,t}] * 10^{-9} \quad (6.150)$$

$$ref_{1511,t} = 1$$

(D₁₅₁₂) Energieeffizienzinvestitionen im Bestand – Amateurvermieter [Mrd. €/a]:

$$a_{1512,t} = \sum_{g \in G_{EScUGESD}} HRF_{g,t} * [IH_{g,t} + IVW_{g,t} + IVE_{g,t} + IVV_{g,t}] * 10^{-9} \quad (6.151)$$

$$ref_{1512,t} = 1$$

¹⁴⁶ Bei der Gebäudehülle wurde die energiebedingte Mehrinvestition und bei der Anlagentechnik die Gesamtinvestition angesetzt.

(D₁₅₁₃) Energieeffizienzinvestitionen im Bestand – Selbstnutzende Eigentümer
[Mrd. €/a]

$$\begin{aligned} a_{1513,t} &= \sum_{g \in G_{ES A} \cup G_{ES B}} HRF_{g,t} * \\ &\quad [IH_{g,t} + IVW_{g,t} + IVE_{g,t} + IVV_{g,t}] * 10^{-9} \quad (6.152) \\ ref_{1513,t} &= 1 \end{aligned}$$

(D₁₅₂₁) Investitionen Neubau [Mrd. €/a]:

$$\begin{aligned} a_{1521,t} &= a_{1125,t} + a_{1126,t} \quad (6.153) \\ ref_{1521,t} &= 1 \end{aligned}$$

6.1.3.3 Normierung

Die Normierung erfolgt analog zu den Formeln (5.77) und (5.78) in Abschnitt 5.4.4 linear. Die verwendeten oberen und unteren Normierungsgrenzen und die Monotonieeigenschaften der Normierungsfunktionen sind ebenfalls in Tabelle 89 angegeben. Die Normierungsgrenzen basieren auf den jährlichen Minima und Maxima mehrerer Modellläufe mit unterschiedlichen Szenarien.

6.1.4 Lebensqualität

6.1.4.1 Erläuterungen zur Indikatorauswahl

Die Dimension *Lebensqualität*¹⁴⁷ (vgl. Tabelle 90) umfasst in *AWOHM* die Kriterien *wirtschaftlicher Wohlstand* und *Luftqualität* (angelehnt an Statistisches Bundesamt 2010). Da die Verteilung der finanziellen Hauptlasten explizit als Forschungsfrage formuliert wurde, werden beim *wirtschaftlichen Wohlstand* unterschiedliche Eigentümerstrukturen und Sichtweisen unterschieden. Somit können Abweichungen von Belastungen identifiziert und ggf. mit umweltpolitischen Instrumenten ausgeglichen oder zumindest gegengesteuert werden. Die Indikatoren *Investitionsbelastung im Bestand* sowie *im Neubau* sind bedingt durch die Datenlage auf das Bohnereinkommen bezogen und zielen

¹⁴⁷ Mit *AWOHM* können nur die aufgeführten Teilaspekte dieser Nachhaltigkeitsdimension abgedeckt werden. Vgl. Fußnote 141.

daher jeweils primär auf die Sichtweise der Bewohner und bei Mietern nur indirekt auf diejenige der Gebäudeeigentümer ab. Mieter müssen ggf. eine von der Investitionshöhe abhängige Modernisierungsumlage tragen, wohingegen die Eigentümer die Investition tätigen müssen. Die *Wirtschaftlichkeit der Maßnahmen* wird zusätzlich betrachtet, da die Aussagekraft hinsichtlich der finanziellen Belastung durch Einbeziehung der Energiekostenreduktion im Vergleich zur Investitionsbelastung größer ist, was allerdings auch für die Unsicherheit gilt. Als Sichtweise wird hierbei zur Umgehung der Problematik der Durchsetzbarkeit von Mieterhöhungen eine kombinierte von Gebäudeeigentümer und Bewohner (sowie Förderer) gewählt. Für das Kriterium *Luftqualität* wird die *Schadstoffbelastung der Luft* im Sinne der Emissionen¹⁴⁸ an NO_x, SO₂, VOC bzw. NMVOC und PM in die Bewertung einbezogen.¹⁴⁹ Diese liegen im Fokus der Forschungsfragen und der Modellanforderungen und gehen u. a. daher als räumlich-zeitlicher Typ B mit hoher räumlicher Differenzierung in die Bewertung ein.

¹⁴⁸ Die Emissionen anderer Sektoren liegen dem Autor auf Gemeindeebene nicht flächendeckend vor. Die Betrachtung von Immissionen ist daher nicht zweckmäßig. Vgl. Fußnote 187 und Abschnitt 8.2 bez. indirekter Emissionen. Diese werden in *AWOHM* nicht berücksichtigt.

¹⁴⁹ Schätzungen für externe Kosten der direkten Gesamtemissionen aus Wohngebäuden liegen bei NO_x, SO₂ und PM in derselben Größenordnung (berechnet basierend auf Maibach u. a. 2007 und Umweltbundesamt 2012c). NMVOC-Emissionen sind diesbezüglich hingegen von untergeordneter Bedeutung. Daher wurden die Gewichte (abweichend von der prinzipiellen Gleichgewichtung) derart gewählt, dass NO_x-, SO₂- und PM-Emissionen die Bewertung dominieren, aber Entwicklungspfade mit niedrigeren NMVOC-Emissionen *ceteris paribus* hinsichtlich der *Schadstoffbelastung der Luft* besser bewertet werden (vgl. Tabelle 90). CH₄-Emissionen werden ausschließlich im Bereich *Klimaschutz* berücksichtigt, sodass VOC-Emissionen nicht in die Bewertung der *Schadstoffbelastung der Luft* eingehen.

Tabelle 90: Staatsrichtindikatoren der Dimension *Lebensqualität* (im Anlehnung an: Stengel u. a. 2012; Ebene 2 im Anlehnung an: Statistisches Bundesamt 2010; Datengrundlage: Annahmen bzw. eigene Berechnungen); B: Bestand; BB: Bestandsbezug; Bg: Betrachtungsgegenstand; G: Gebäude; HH: Haushalt; V: Bestandsveränderung

Ebene 2	Ebene 3	Kürzel	Ebene 4 Name	Gewichtung [-]	Einheit vor der Normierung	Normierungsfunktion		Steigend	BB	Bg		
						Untere Grenze	Obere Grenze					
Wirtschaftlicher Wohlstand	Wirtschaftlichkeit der Maßnahmen	D _{z111}	Barwert der Ausgaben (zzgl. Förderung, abzüglich Restwert) für professionelle oder institutionelle Vermieter und Mieter	1/3	Mrd. €	13	216	0	V	G		
			Barwert der Ausgaben (zzgl. Förderung, abzüglich Restwert) für Amateurvermieter und Mieter	1/3	Mrd. €	18	312	0	V	G		
		D _{z113}	Barwert der Ausgaben (zzgl. Förderung, abzüglich Restwert) für selbstnutzende Eigentümer	1/3	Mrd. €	34	529	0	V	G		
			Professionelle oder institutionelle Vermieter	1/3	€/€-Bewohnerjahreseinkommen	0,01	0,08	0	V	HH		
		D _{z122}	Amateurvermieter	1/3	€/€-Bewohnerjahreseinkommen	0,01	0,11	0	V	HH		
			Selbstnutzende Eigentümer	1/3	€/€-Bewohnerjahreseinkommen	0,01	0,11	0	V	HH		
		D _{z131}	Professionelle oder institutionelle Vermieter	1/3	€/€-Bewohnerjahreseinkommen	0,00	0,00 ⁵⁰	0	V	HH		
			Amateurvermieter	1/3	€/€-Bewohnerjahreseinkommen	0,00	0,00	0	V	HH		
		Luftqualität	Schadstoffbelastung der Luft	D _{z121}	NO _x -Emissionen	16/50	€/km ² a)	0,01	0,09	0	B	G
					SO ₂ -Emissionen	16/50	€/km ² a)	0,01	0,05	0	B	G
D _{z114}	KOC-Emissionen			0	€/km ² a)	0,00	0,01	0	B	G		
	NMVOE-Emissionen			2/50	€/km ² a)	0,00	0,01	0	B	G		
D _{z115}	PM-Emissionen			16/50	€/km ² a)	0,00	0,03	0	B	G		

⁵⁰ Beim Neubau wurde vereinfachend von selbstnutzenden Eigentümern bzw. selbstnutzenden Eigentümergemeinschaften ausgegangen (vgl. Abschnitt 5.4.6).

6.1.4.2 Formale Spezifikation

(D₂₁₁₁) Barwert der Ausgaben (zzgl. Förderung, abzüglich Restwert) für professionelle oder institutionelle Vermieter und Mieter [Mrd. €]:

$$a_{2111,t} = \sum_{g \in G_{ES E}} \left[\sum_{\tau=1}^t HRF_{g,\tau} * \frac{IH_{g,\tau} + IVW_{g,\tau} + IVE_{g,\tau} + IVV_{g,\tau} + \ddot{O}_3(h_{g,\tau}, v_{g,\tau}) * A_g * (1 - ALH_{g,\tau} / 2)}{(1+i)^\tau} - \frac{IH_{g,\tau} * \max\left(\frac{TH-(t-\tau)}{TH}, 0\right)}{(1+i)^t} - \frac{IVW_{g,\tau} * \max\left(\frac{TVW-(t-\tau)}{TVW}, 0\right)}{(1+i)^t} - \frac{IVE_{g,\tau} * \max\left(\frac{TVE-(t-\tau)}{TVE}, 0\right)}{(1+i)^t} - \frac{IVV_{g,\tau} * \max\left(\frac{TVV-(t-\tau)}{TVV}, 0\right)}{(1+i)^t} \right] * 10^{-9} \quad (6.154)$$

$$ref_{2111,t} = 1$$

(D₂₁₁₂) Barwert der Ausgaben (zzgl. Förderung, abzüglich Restwert) für Amateurvermieter und Mieter [Mrd. €]:

$$a_{2112,t} = \sum_{g \in G_{ES C} \cup G_{ES D}} \left[\sum_{\tau=1}^t HRF_{g,\tau} * \frac{IH_{g,\tau} + IVW_{g,\tau} + IVE_{g,\tau} + IVV_{g,\tau} + \ddot{O}_3(h_{g,\tau}, v_{g,\tau}) * A_g * (1 - ALH_{g,\tau} / 2)}{(1+i)^\tau} - \frac{IH_{g,\tau} * \max\left(\frac{TH-(t-\tau)}{TH}, 0\right)}{(1+i)^t} - \frac{IVW_{g,\tau} * \max\left(\frac{TVW-(t-\tau)}{TVW}, 0\right)}{(1+i)^t} - \frac{IVE_{g,\tau} * \max\left(\frac{TVE-(t-\tau)}{TVE}, 0\right)}{(1+i)^t} - \frac{IVV_{g,\tau} * \max\left(\frac{TVV-(t-\tau)}{TVV}, 0\right)}{(1+i)^t} \right] * 10^{-9} \quad (6.155)$$

$$ref_{2112,t} = 1$$

(D₂₁₁₃) Barwert der Ausgaben (zzgl. Förderung, abzüglich Restwert) für selbstnutzende Eigentümer [Mrd. €]:

$$a_{2113,t} = \sum_{g \in G_{ES A} \cup G_{ES B}} \left[\sum_{\tau=1}^t HRF_{g,\tau} * \frac{IH_{g,\tau} + IVW_{g,\tau} + IVE_{g,\tau} + IVV_{g,\tau} + \ddot{O}_3(h_{g,\tau}, v_{g,\tau}) * A_g * (1 - ALH_{g,\tau} / 2)}{(1+i)^\tau} - \frac{IH_{g,\tau} * \max\left(\frac{TH-(t-\tau)}{TH}, 0\right)}{(1+i)^t} - \frac{IVW_{g,\tau} * \max\left(\frac{TVW-(t-\tau)}{TVW}, 0\right)}{(1+i)^t} - \frac{IVE_{g,\tau} * \max\left(\frac{TVE-(t-\tau)}{TVE}, 0\right)}{(1+i)^t} - \frac{IVV_{g,\tau} * \max\left(\frac{TVV-(t-\tau)}{TVV}, 0\right)}{(1+i)^t} \right] * 10^{-9} \quad (6.156)$$

$$ref_{2113,t} = 1$$

(D₂₁₂₁) Investitionsbelastung im Bestand - Professionelle oder institutionelle Vermieter [€/€]:

$$a_{2121,t} = \sum_{g \in G_{ES E}} HRF_{g,t} * [IH_{g,t} + IVW_{g,t} + IVE_{g,t} + IVV_{g,t}] \quad (6.157)$$

$$ref_{2121,t} = \sum_{g \in G_{ES E}} \sum_{b \in B_{g,t}} HRF_{b,t} * (1 - ALH_{b,t}) * EK_{b,t} * 12$$

(D₂₁₂₂) Investitionsbelastung¹⁵¹ im Bestand – Amateurvermieter [€/€]:

$$\begin{aligned} a_{2122,t} &= \sum_{g \in G_{ES C} \cup G_{ES D}} HRF_{g,t} * [IH_{g,t} + IVW_{g,t} + IVE_{g,t} + IVV_{g,t}] & (6.158) \\ ref_{2122,t} &= \sum_{g \in G_{ES C} \cup G_{ES D}} \sum_{b \in B_{g,t}} HRF_{b,t} * (1 - ALH_{b,t}) * EK_{b,t} * 12 \end{aligned}$$

(D₂₁₂₃) Investitionsbelastung im Bestand – Selbstnutzende Eigentümer [€/€]:

$$\begin{aligned} a_{2123,t} &= \sum_{g \in G_{ES A} \cup G_{ES B}} HRF_{g,t} * [IH_{g,t} + IVW_{g,t} + IVE_{g,t} + IVV_{g,t}] & (6.159) \\ ref_{2123,t} &= \sum_{g \in G_{ES A} \cup G_{ES B}} \sum_{b \in B_{g,t}} HRF_{b,t} * (1 - ALH_{b,t}) * EK_{b,t} * 12 \end{aligned}$$

(D₂₁₃₁) Investitionsbelastung im Neubau – Professionelle oder institutionelle Vermieter [€/€]:

$$\begin{aligned} a_{2131,t} &= \sum_{g \in G_{ES E}} HRF_{g,t} * [I300_{g,t} + I420_{g,t}] & (6.160) \\ ref_{2131,t} &= \sum_{g \in G_{ES E}} \sum_{b \in B_{g,t}} HRF_{b,t} * (1 - ALH_{b,t}) * EK_{b,t} * 12 \end{aligned}$$

(D₂₁₃₂) Investitionsbelastung im Neubau – Amateurvermieter [€/€]:

$$\begin{aligned} a_{2132,t} &= \sum_{g \in G_{ES C} \cup G_{ES D}} HRF_{g,t} * [I300_{g,t} + I420_{g,t}] & (6.161) \\ ref_{2132,t} &= \sum_{g \in G_{ES C} \cup G_{ES D}} \sum_{b \in B_{g,t}} HRF_{b,t} * (1 - ALH_{b,t}) * EK_{b,t} * 12 \end{aligned}$$

(D₂₁₃₃) Investitionsbelastung im Neubau – Selbstnutzende Eigentümer [€/€]:

$$\begin{aligned} a_{2133,t} &= \sum_{g \in G_{ES A} \cup G_{ES B}} HRF_{g,t} * [I300_{g,t} + I420_{g,t}] & (6.162) \\ ref_{2133,t} &= \sum_{g \in G_{ES A} \cup G_{ES B}} \sum_{b \in B_{g,t}} HRF_{b,t} * (1 - ALH_{b,t}) * EK_{b,t} * 12 \end{aligned}$$

(D₂₂₁₁₋₂₂₁₅) NO_x-, SO₂-, VOC-, NMVOC- und PM-Emissionen [t/(km² a)]:

$$\begin{aligned} a_{2211,g,t} &= \ddot{U}_8(h_{g,t}, v_{g,t}) * A_g * 10^{-3} \\ a_{2212,g,t} &= \ddot{U}_9(h_{g,t}, v_{g,t}) * A_g * 10^{-3} \\ a_{2213,g,t} &= [\ddot{U}_6(h_{g,t}, v_{g,t}) + \ddot{U}_{10}(h_{g,t}, v_{g,t})] * A_g * 10^{-3} & (6.163) \\ a_{2214,g,t} &= \ddot{U}_{10}(h_{g,t}, v_{g,t}) * A_g * 10^{-3} \\ a_{2215,g,t} &= \ddot{U}_7(h_{g,t}, v_{g,t}) * A_g * 10^{-3} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} ref_{221z,t} &= \sum_{pg \in PG} SF_{pg}; z \in \{1, \dots, 5\} \\ ref_{221z,pg} &= SF_{pg}; z \in \{1, \dots, 5\} \\ b_{221z,g,t} &= a_{221z,g,t}; z \in \{1, \dots, 5\} \end{aligned}$$

¹⁵¹ Bei der Gebäudehülle wurde die energiebedingte Mehrinvestition und bei der Anlagentechnik die Gesamtinvestition angesetzt.

6.1.4.3 Normierung

Die Normierung erfolgt analog zur Dimension *Generationengerechtigkeit*. Die Normierungsgrenzen und Monotonieeigenschaften der Normierungsfunktionen sind in Tabelle 90 angegeben.

6.1.5 Sozialer Zusammenhalt

6.1.5.1 Erläuterungen zur Indikatoreauswahl

Die Dimension *sozialer Zusammenhalt*¹⁵² (vgl. Tabelle 91) umfasst in *AWOHM* das Kriterium *Gleichberechtigung* und auf Ebene 3 die *Einkommensverteilung (nach Wohnen) für Selbstnutzer und Mieter*. Diese werden für Selbstnutzer weiter differenziert in Mittelwert und 20%-Quantil¹⁵³ des verfügbaren Einkommens abzüglich Energiekosten für Raumwärme und Warmwasser sowie der Abnutzung der Investition im Sinne der Annuität. Für Mieter werden zudem die Kaltmieten (vor der Sanierung) abgezogen. Somit können die finanziellen Belastungen der Bewohner vor dem Hintergrund ihrer wirtschaftlichen Stärke beurteilt und in die Bewertung aus Staatssicht einbezogen werden. Durch die Verwendung von Mittelwert und 20%-Quantil werden die Streuungen innerhalb der Eigentümerstrukturen und somit ggf. ein Potenzial für Spannungen sichtbar.

6.1.5.2 Formale Spezifikation

(D₃₁₁₁) Mittleres verfügbares Einkommen von Selbstnutzern abzüglich Energiekosten für Raumwärme und Warmwasser sowie der Abnutzung der Investition [€/ (Monat Person)]:

$$c_{3111,pb,pgk,t} = \frac{\sum_{b \in (B_{GEB,t} \cup B_{GEM,t}) \cap B_{pb,pgk,t}} c_{3111,b,t} * HRF_{b,t} * (1 - ALH_{b,t})}{\sum_{b \in (B_{GEB,t} \cup B_{GEM,t}) \cap B_{pb,pgk,t}} HRF_{b,t} * (1 - ALH_{b,t})} \quad (6.164)$$

¹⁵² Mit *AWOHM* können nur die aufgeführten Teilaspekte dieser Nachhaltigkeitsdimension abgedeckt werden. Vgl. Fußnote 141.

¹⁵³ Bei dem Einsatz von *AWOHM* für konkrete Entscheidungsträger kann die Größe den jeweiligen Präferenzen entsprechend angepasst werden.

$$\text{mit } c_{3111,b,t} = \frac{EK_{b,t} - \ddot{O}_3(h_{g,b,t,t}, v_{g,b,t,t}) * \frac{Aw_{b,t}}{12} - \frac{Aw_{b,t} * i_{g,b,t,t}}{Ag_{b,t}}}{HG_{b,t}}$$

$$a_{3111,t} = \frac{\sum_{b \in (B_{GEB,t} \cup B_{GEM,t})} c_{3111,b,t} * HRF_{b,t} * (1 - ALH_{b,t})}{\sum_{b \in (B_{GEB,t} \cup B_{GEM,t})} HRF_{b,t} * (1 - ALH_{b,t})}$$

$$ref_{3111,t} = 1$$

(D₃₁₁₂) 20%-Quantil des verfügbaren Einkommens von Selbstnutzern abzüglich Energiekosten für Raumwärme und Warmwasser sowie der Abnutzung der Investition [€/ (Monat Person)]:

$$c_{3112,pb,pgk,t} = Q_{0,2}(\{c_{3111,b,t} | b \in (B_{GEB,t} \cup B_{GEM,t}) \cap B_{pb,pgk,t}\})$$

$$a_{3112,t} = Q_{0,2}(\{c_{3111,b,t} | b \in (B_{GEB,t} \cup B_{GEM,t})\}) \quad (6.165)$$

(Unterschiede in der Gewichtung wurden vernachlässigt)

$$ref_{3112,t} = 1$$

(D₃₁₂₁) Mittleres verfügbares Einkommen von Mietern abzüglich Energiekosten für Raumwärme und Warmwasser sowie Kaltmiete [€/ (Monat Person)]:

$$c_{3121,pb,pgk,t} = \frac{\sum_{b \in B_{MIET,t} \cap B_{pb,pgk,t}} c_{3121,b,t} * HRF_{b,t} * (1 - ALH_{b,t})}{\sum_{b \in B_{MIET,t} \cap B_{pb,pgk,t}} HRF_{b,t} * (1 - ALH_{b,t})} \quad (6.166)$$

$$\text{mit } c_{3121,b,t} = \frac{EK_{b,t} - \ddot{O}_3(h_{g,b,t,t}, v_{g,b,t,t}) * \frac{Aw_{b,t}}{12} - KM_{w,b,t}}{HG_{b,t}}$$

$$a_{3121,t} = \frac{\sum_{b \in B_{MIET,t}} c_{3121,b,t} * HRF_{b,t} * (1 - ALH_{b,t})}{\sum_{b \in B_{MIET,t}} HRF_{b,t} * (1 - ALH_{b,t})}$$

$$ref_{3121,t} = 1$$

(D₃₁₂₂) 20%-Quantil des verfügbaren Einkommens von Mietern abzüglich Energiekosten für Raumwärme und Warmwasser sowie Kaltmiete [€/ (Monat Person)]:

$$c_{3122,pb,pgk,t} = Q_{0,2}(\{c_{3121,b,t} | b \in B_{MIET,t} \cap B_{pb,pgk,t}\}) \quad (6.167)$$

$$a_{3122,t} = Q_{0,2}(\{c_{3121,b,t} | b \in B_{MIET,t}\})$$

(Unterschiede in der Gewichtung wurden vernachlässigt)

$$ref_{3122,t} = 1$$

6.1.5.3 Normierung

Die Normierung erfolgt analog zur Dimension *Generationengerechtigkeit*. Die Normierungsgrenzen und Monotonieeigenschaften der Normierungsfunktionen sind in Tabelle 91 angegeben.

Tabelle 91: Staatssichtindikatoren der Dimension *sozialer Zusammenhalt* (Ebene 2 in Anlehnung an: Statistisches Bundesamt 2010; Datengrundlage: Annahmen bzw. eigene Berechnungen); B: Bestand; BB: Bestandsbezug; BG: Betrachtungsgegenstand; HH: Haushalt; WW: Warmwasser

Ebene 2	Ebene 3	Kurz- ziel	Ebene 4 Name	Gewichtung [-]	Einheit vor der Normie- rung	Normierungsfunktion		BB	BV	
						Untere Gren- ze	Obere Gren- ze			
Gleichberechti- gung	Einkommensverteilung (nach Wohnen) Selbstnutzer	D_{3111}	Mittleres verfügbares Einkommen von Selbstnut- zern abzüglich Energiekosten für Raumwärme und WW sowie der Abnutzung der Investition	1/2	€/ (Monat Person)	621	1.088	1	B	HH
		D_{3112}	20%-Quantil des verfügbaren Einkommens von Selbstnutzern abzüglich Energiekosten für Raum- wärme und WW sowie der Abnutzung der Investi- tion	1/2	€/ (Monat Person)	277	553	1	B	HH
	Einkommensverteilung (nach Wohnen) Mieter	D_{3121}	Mittleres verfügbares Einkommen von Mietern abzüglich Energiekosten für Raumwärme und WW sowie Kaltmiete	1/2	€/ (Monat Person)	268	700	1	B	HH
		D_{3122}	20%-Quantil des verfügbaren Einkommens von Mietern abzüglich Energiekosten für Raumwärme sowie Kaltmiete	1/2	€/ (Monat Person)	-76	291	1	B	HH

6.2 Multivariate Analysen

Werden Szenarien und damit Bündel umweltpolitischer Instrumente vorgegeben, so können diese mit dem im vorigen Abschnitt beschriebenen, indikatorenbasierten Ansatz bewertet, verglichen und interpretiert werden. Dabei werden auf Mikroebene vorliegende Informationen über Gebäude, Haushalte, umgesetzte Maßnahmen und zugehörige Kennwerte aggregiert, aber aus diesen nur bedingt Vorschläge für eine Neu- oder Umgestaltung umweltpolitischer Instrumente abgeleitet. Auch weiterführende Analysen zur Verteilung der finanziellen Belastungen innerhalb der Bevölkerung und die Identifizierung von Abhängigkeiten zwischen Kennwerten und deren Entwicklung auf Mikroebene werden durch den indikatorenbasierten Ansatz nicht abgedeckt. Diese Themen sind jedoch zentral für die Beantwortung der Forschungsfragen und werden daher durch die Anpassung und Anwendung strukturentdeckender, multivariater Analyseverfahren (vgl. Backhaus u. a., 2003) berücksichtigt. Zunächst ordnet Abschnitt 6.2.1 die mittels multivariater Verfahren behandelten Problemstellungen in den Gesamtkontext ein. In den folgenden Abschnitten werden diese Problemstellungen präzisiert sowie entsprechende Ansätze zu deren Lösung entwickelt. Konkret wird jeweils ein Ansatz

- zur Ausgestaltung von Mindestanforderungspaketen in Abschnitt 6.2.2,
- zur Ausgestaltung von Förderpaketen in Abschnitt 6.2.3,
- zur Zielgruppenadaption umweltpolitischer Instrumente in Abschnitt 6.2.4,
- zur Identifizierung „sozialer Brennpunkte“ in Abschnitt 6.2.5 und
- zur Identifizierung von Abhängigkeiten in Abschnitt 6.2.6

beschrieben. Die exemplarische Anwendung der Ansätze erfolgt im Rahmen der Modellanwendung in Kapitel 7.

6.2.1 Einordnung in den Gesamtkontext

Übergeordnetes Ziel der Arbeit ist die Entwicklung und Anwendung einer Methodik zur Identifizierung und Konzipierung adäquater Bündel umweltpolitischer Instrumente im Themenfeld Wärmenutzung in Wohngebäuden. Die Adäquatheit von Instrumentenbündeln wird hierbei durch die indikatorenbasierte Bewertung aus Staatssicht operationalisiert. Die Auswahl der zu untersuchenden Instrumentenbündel und Szenarien orientiert sich dabei an existierenden, geplanten oder diskutierten Instrumentenausgestaltungen (vgl. Abschnitt 2.3.1). Für jedes Szenario wird, wie in Abbildung 24 dargestellt, ein Modelllauf durchgeführt, aus dem Modellergebnisse auf Mikroebene resultieren. Diese werden aggregiert und im Rahmen der indikatorenbasierten Bewertung und Analyse verglichen. Somit können Szenarien und umweltpolitische Instrumentenbündel mit den höchsten Bewertungen aus Staatssicht identifiziert werden.

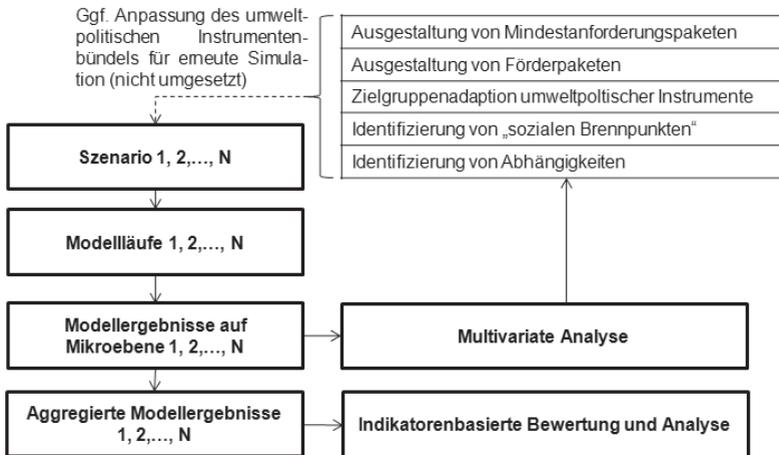


Abbildung 24: Einordnung der multivariaten Analysen in den Gesamtkontext von AWOHM

Ein Kritikpunkt an diesem Vorgehen ist, dass aufgrund der Notwendigkeit zur Vorgabe der zu analysierenden Instrumentenbündel keine Vorschläge für eine

Neu- oder Umgestaltung umweltpolitischer Instrumentenbündel als Modellergebnis abgeleitet werden. Somit können keine neuen, vielversprechenden Instrumentenausgestaltungen generiert werden. Ein weiterer Kritikpunkt an der indikatorenbasierten Bewertung und Analyse ist, dass die Aggregation der Modellergebnisse auf Mikroebene unabhängig von deren quantitativen Zusammenhängen erfolgt. Diesen Kritikpunkten soll mittels auf multivariaten Analyseverfahren beruhenden Ansätzen begegnet werden, in denen basierend auf den auf Mikroebene vorliegenden Modellergebnissen unterschiedliche Zeitpunkte und Szenarien verglichen werden. Dadurch sollen einerseits Vorschläge für die Neu- bzw. Umgestaltung von Mindestanforderungs- und Förderpaketen sowie zur Zielgruppenadaption umweltpolitischer Instrumente identifiziert werden. Andererseits sollen im Hinblick auf die Forschungsfragen Zusammenhänge zwischen den Modellergebnissen auf Mikroebene aufgedeckt werden. Dabei liegen insbesondere „soziale Brennpunkte“ im Sinne übermäßiger finanzieller Belastungen sowie Abhängigkeiten zwischen den Emissionsminderungen im Fokus. Die Szenarien können dann für eine erneute Simulation an die gewonnenen Erkenntnisse angepasst werden. Auf diese Rückkopplung wurde allerdings im Rahmen dieser Arbeit verzichtet.

Das Problem der Identifizierung adäquater bzw. aus Staatssicht optimaler Instrumentenbündel kann als Optimierungsproblem mit der Bewertung aus Staatssicht als Zielfunktion und den umweltpolitischen Instrumenten als Entscheidungsvariablen interpretiert werden. Gemäß Nebenbedingungen erfolgt die Entscheidung der Gebäudeeigentümer auf Basis ihrer Nutzenfunktionen. Wird die Unabhängigkeit dieser Nutzenfunktionen von den umweltpolitischen Instrumenten unterstellt, so kann der Staat durch die umweltpolitischen Instrumente nur in die Nutzenfunktion eingehende Indikatoren beeinflussen. Der Staat kann dabei durch Investitionszuschüsse, zinsgünstige Darlehen, Steuervorschriften und Mindestanforderungen insbesondere Einfluss nehmen auf die Wirtschaftlichkeit von Maßnahmenpaketen aus Eigentümersicht, die Liquidität der Eigentümer und die „Illegalität“ von Maßnahmenpaketen. Die

Form der Nutzenfunktion kann ggf. durch suasorische Instrumente beeinflusst werden. Die Berechnung eines Zielfunktionswerts erfordert in *AWOHH* eine vollständige Simulation bis zum Ende des Betrachtungszeitraums. Dies entspricht jeweils einer Dauer von mehreren Stunden. Die Zielfunktion ist weder stetig noch konvex. Zudem können Änderungen an der Struktur der umweltpolitischen Instrumente den Zielfunktionswert verbessern, sodass auch die Funktionsform a priori nicht definitiv bekannt ist. Aus diesen Gründen wird nicht versucht, ein globales Optimum im Sinne des *Operations Research*, falls überhaupt existent und eindeutig, zu bestimmen. Stattdessen wird die Wohngebäude- und Haushaltsentwicklung für ausgewählte Bündel umweltpolitischer Instrumente simuliert, die Ergebnisse werden analysiert und es wird versucht, mittels Analyseverfahren verbesserte Ausgestaltungen der umweltpolitischen Instrumente zu identifizieren. Das Vorgehen kann als Heuristik in Bezug auf das Optimierungsproblem interpretiert werden.

6.2.2 Ausgestaltung von Mindestanforderungspaketen

Um umweltpolitische Instrumente modellgestützt gestalten zu können, werden zunächst die grundsätzlichen Ziele des Staates hinter dem Instrument, soweit möglich, als Gewichtungen der Nutzenfunktionen der Akteure (vgl. Abschnitt 5.4.4) formuliert, die Nutzenfunktionen in einem Szenario zusammengeführt und eine Simulation durchgeführt. Anschließend werden die Simulationsergebnisse herangezogen, um die konkrete Ausgestaltung der Instrumente abzuleiten. Für die Ausgestaltung von Mindestanforderungspaketen wird angenommen, dass diese primär die Umsetzung der wirtschaftlichsten Maßnahmenpakete bezwecken und dadurch Vorteile in den Bereichen *Ressourcenschonung*, *Klimaschutz* und *Luftqualität* (vgl. Abschnitt 6.1) bewirken. Zur Identifizierung von Maßnahmen und Maßnahmenpaketen, die den durch Mindestanforderungen verfolgten Zielen gerecht werden, wird daher das Szenario *KW11* definiert (vgl. Tabelle 114 in Abschnitt 7.3), in dem alle Akteure gemäß dem Entscheidungsansatz *Max Kapitalwert – Selbstnutzersicht* (vgl. Kapitel 5) handeln. Anschließend werden die in *AWOHH* umgesetzten Maßnahmenpake-

te analysiert und können in geeignet aggregierter Form als Mindestanforderung gesetzt werden. Dabei werden auf Gebäudeebene

- Gebäudeeigenschaften, d. h. die Gebäude charakterisierende Variablen, und
- Maßnahmeneigenschaften, d. h. die umgesetzten Maßnahmen charakterisierende Variablen,

in einer Matrix zusammengefasst, die mittels eines strukturerkennenden multivariaten Analyseverfahrens untersucht wird. Es wird angenommen, dass sich die Mindestanforderungen nur auf Gebäudeeigenschaften und nicht auf Haushaltseigenschaften beschränken. Die Mindestanforderungen können analog zur Energieeinsparverordnung sowohl komponentenbezogen, durch maximal zulässige Wärmedurchgangskoeffizienten für Außenbauteile und Anforderungen an die Wärmeversorgung, als auch gebäudebezogen, durch einen maximal zulässigen spezifischen Transmissionswärmeverlust und Primärenergiebedarf, spezifiziert werden. Die folgende Analyse konzentriert sich auf komponentenbezogene Mindestanforderungen, da diese auch bei Teilsanierungen Verwendung finden können. Der aufgezeigte Ansatz ist aber prinzipiell an die gebäudebezogene Mindestanforderungsspezifikation anpassbar.

Bei der Mindestanforderungsspezifikation können zwei Extremfälle differenziert werden:

- Fall A – Spezifikation der Mindestanforderungen unabhängig von den Gebäudeeigenschaften (1 Mindestanforderungspaket)
- Fall B – Spezifikation der Mindestanforderungen für jedes Gebäude individuell (zahlreiche Mindestanforderungspakete)

Bei Fall A wird vernachlässigt, dass Gebäudeeigenschaften, und damit der Zustand des Gebäudes vor der Sanierung, die Wirtschaftlichkeit von Maßnahmenpaketen beeinflussen. Die Gebäude werden genau einem Mindestanforderungspaket zugeordnet, das heterogen hinsichtlich Gebäude- und Maßnahmeneigenschaften ist. Die Mindestanforderung ist einfach und transparent,

entspricht aber einem Kompromiss zwischen den unterschiedlichen, aus Staatssicht „idealen“ Zielzuständen. Das kann dazu führen, dass für bestimmte Gebäude bzw. Gebäudegruppen bspw. eine zu ambitionierte Dämmung vorgeschrieben oder eine adäquate Anlagentechnik untersagt wird. Bei Fall B wird dahingegen jedes Gebäude als individueller Fall betrachtet und diese Problematik tritt nicht auf. Die aufgrund der Heterogenität des Gebäudebestands hohe Anzahl an Mindestanforderungspaketen führt jedoch zur Nichtanwendbarkeit dieses Falls in der Realität.¹⁵⁴

Im Folgenden wird daher beschrieben, wie mittels eines strukturentdeckenden Analyseverfahrens Kompromisse identifiziert werden können, die zwischen Fall A und B liegen. Da somit die *Bündelung von Objekten* anhand von Gebäude- und Maßeigenschaftens im Vordergrund steht, wird die Clusteranalyse als Verfahren gewählt (vgl. Backhaus u. a., 2003).¹⁵⁵ Das weitere Vorgehen orientiert sich an den acht Schritten eines Schemas für die Anwendung der Clusteranalyse, das von Backhaus u. a. (2003) erläutert wurde.

Problemstellung: Ziel der Clusteranalyse ist die Differenzierung der komponentenbezogenen Mindestanforderungen für die Sanierung von Gebäuden nach Gebäudeeigenschaften bei niedriger Mindestanforderungspaketanzahl. Dabei sollen Gebäude zusammengefasst werden, für die einerseits ähnliche Maßnahmenpakete gemäß dem Szenario *KW11* optimal sind. Andererseits sollen die Gebäude auch im Ausgangszustand ähnlich sein, damit ein entsprechender Ausgangszustand für den Cluster spezifiziert werden kann.

Zu klassifizierende Objekte: Die zu klassifizierenden Objekte entsprechen allen Wohngebäuden aus *AWOHH*.

¹⁵⁴ Alternativ könnte die Spezifikation bei obligatorischer Wirtschaftlichkeitsrechnung auf wirtschaftlicher Ebene erfolgen. Eine Wirtschaftlichkeitsrechnung bedarf allerdings klarer Vorgaben und weist eine hohe Komplexität sowie zahlreiche Beeinflussungsmöglichkeiten auf.

¹⁵⁵ Zur Vereinfachung der Mindestanforderungsspezifikation bei vorgegebenen Objektbündeln kann im nächsten Schritt auch die *Bündelung von Variablen* mittels Faktorenanalyse, ggf. auch in einem integrierten Ansatz, berücksichtigt werden.

Variablenauswahl: Tabelle 92 fasst die ausgewählten Variablen zusammen. Zur Spezifikation der Maßnahmenpakete nach der Sanierung werden komponentenbezogene Wärmedurchgangskoeffizienten sowie die Wärmeversorgungspakete spezifizierende Variablen (Energieträger und Effizienz) herangezogen. Zur Differenzierung der Mindestanforderungen nach Gebäudeeigenschaften werden die Maßnahmenpakete vor der Sanierung spezifizierende Variablen sowie die Anzahl der Wohneinheiten und das Baujahr verwendet. Die ausgewählten Variablen sind alle metrisch und werden mittels z-Transformation¹⁵⁶ auf einen Mittelwert von 0 und eine Varianz von 1 standardisiert.¹⁵⁷

Tabelle 92: Variablen für die Ausgestaltung von Mindestanforderungspaketen in *AWOHM* mittels einer Clusteranalyse; ET: Energieträger (Datengrundlage: Annahmen)

Variablen		Gebäude 1 (Bsp.)	Gebäude 2 (Bsp.)	Skalenniveau	Nr.	
Gebäudeeigenschaften	Basiseigenschaften	Anzahl Wohneinheiten [Wohneinheiten]	1	2	Metrisch	1
		Baujahr [a]	1970	1930	Metrisch	2
	Wärmedurchgangskoeffizienten (vor Sanierung)	Ob. Gebäudeabschluss [W/(m ² K)]	1,3	0,5	Metrisch	3
		Wand [W/(m ² K)]	1,2	1,1	Metrisch	4
		Fenster [W/(m ² K)]	2,5	1,9	Metrisch	5
		Unt. Gebäudeabschluss [W/(m ² K)]	1,4	1,0	Metrisch	6
		Anteil Fernwärme	0%	0%	Metrisch	7
	Wärmeversorgungspaket für Raumwärme und Warmwasser (vor Sanierung)	Anteil Gas	100%	0%	Metrisch	8
		Anteil Heizöl	0%	100%	Metrisch	9
		Anteil Holz	0%	0%	Metrisch	10
		Anteil sonstige fossile ET	0%	0%	Metrisch	11
		Anteil sonstige erneuerb. ET	0%	0%	Metrisch	12
		Effizienz Hauptwärmeerzeuger für Raumwärme	80%	80%	Metrisch	13
Maßnahmeneigenschaften	Wärmedurchgangskoeffizienten (nach Sanierung)	Ob. Gebäudeabschluss [W/(m ² K)]	0,25	0,3	Metrisch	14
		Wand [W/(m ² K)]	0,3	1,2	Metrisch	15
		Fenster [W/(m ² K)]	1,1	1,1	Metrisch	16
		Unt. Gebäudeabschluss [W/(m ² K)]	0,5	0,7	Metrisch	17
	Wärmeversorgungspaket für Raumwärme und Warmwasser (nach Sanierung)	Anteil Fernwärme	0%	0%	Metrisch	18
		Anteil Gas	80%	0%	Metrisch	19
		Anteil Heizöl	0%	80%	Metrisch	20
		Anteil Holz	0%	0%	Metrisch	21
		Anteil sonstige fossile ET	0%	0%	Metrisch	22
		Anteil sonstige erneuerb. ET	20%	20%	Metrisch	23
		Effizienz Hauptwärmeerzeuger für Raumwärme	95%	90%	Metrisch	24

¹⁵⁶ Vgl. Janssen & Laatz 2007 bez. der z-Transformation.

¹⁵⁷ Ein Ausschluss von Variablen könnte bspw. zweckmäßig sein, wenn sich Gebäude, für die ein bestimmtes Maßnahmenpaket optimal ist, bereits auf Basis des Baujahrs und der Gebäudegröße hinreichend gut spezifizieren ließen, sodass weitere Gebäudeeigenschaften vernachlässigt werden könnten.

Proximitätsmaß: Als Proximitätsmaß wird das Distanzmaß quadrierte euklidische Distanz verwendet.

Fusionierungsalgorithmus: Es wird der partitionierende *k-means*-Algorithmus von MATLAB R2011b verwendet¹⁵⁸. Dieser minimiert als Heterogenitätsmaß die Summe aller Distanzen von Punkten zu ihren jeweiligen Clusterschwerpunkten (MathWorks 2011).

Clusteranzahl: Die Clusteranzahl bestimmt den Differenzierungsgrad der Mindestanforderungen. Für einen Cluster entspricht der Ansatz dem Fall A. Eine Clusteranalyse wird sukzessive für eine Clusteranzahl von 1, 2, ..., N durchgeführt. Somit erhält man für jede Clusteranzahl ein Heterogenitätsmaß. Die Auswahl der vielversprechendsten Clusteranzahl erfolgt in Abhängigkeit von den Ergebnissen anhand des Ellbogenkriteriums (vgl. Backhaus u. a., 2003).

Clusterbildung: Die Anwendung der Clusteranalyse erfolgt in Kapitel 7.

Analyse und Interpretation¹⁵⁹: Für jeden Cluster, d. h. für jedes Mindestanforderungspaket, müssen die Gebäude- und Maßnahmeneigenschaften spezifiziert werden. Hierbei dienen die Variablenmittelwerte je Cluster nur als erstes Indiz. Um eine vollständige, anwendungsorientierte Mindestanforderungspaketspezifikation abzuleiten, müssen die jeweiligen Cluster näher analysiert werden. Analyse und Interpretation erfolgen in Kapitel 7.¹⁶⁰

Grundsätzlich unterstützen die mit dem beschriebenen Ansatz abgeleiteten Mindestanforderungspakete die Entscheidung der Eigentümer in Richtung der wirtschaftlichsten Maßnahmenpakete und können somit ggf. etwaige Informa-

¹⁵⁸ Mit Ausnahme des Werts *singleton* für den Parameter *emptyaction* wurden die Standardeinstellungen beibehalten.

¹⁵⁹ Die im Rahmen der Modellanwendung in Kapitel 7 abgeleiteten Ergebnisse waren trotz des nicht-deterministischen Fusionierungsalgorithmus strukturell reproduzierbar und die Cluster inhaltlich interpretierbar. Da somit aus anwendungsorientierter Sicht verwertbare Ergebnisse resultierten, wurde auf weitere Stabilitäts- und Validitätsprüfungen verzichtet.

¹⁶⁰ Im Rahmen der Arbeit wurde nicht analysiert, ob jedes Gebäude rein anhand der Gebäudeeigenschaften genau einem Cluster zugeordnet werden kann.

tionsdefizite ausgleichen. Der Ansatz kann als Heuristik im Sinne des übergeordneten Optimierungsproblems aus Staatssicht (vgl. Abschnitt 6.2.1) interpretiert werden. Das verwendete Heterogenitätsmaß spiegelt jedoch nicht direkt die Bewertung aus Staatssicht wider, sodass für eine präzise Bewertung der abgeleiteten Mindestanforderungspakete diese in Szenarien formuliert und entsprechende Simulationen durchgeführt werden müssen. Je nach Spezifikation der Mindestanforderungen können diese direkt in den bereits implementierten Modellstrukturen umgesetzt werden oder geringfügige Modellanpassungen¹⁶¹ erfordern.

6.2.3 Ausgestaltung von Förderpaketen

Für die Förderung von Investitionen in die energetische Modernisierung von Gebäudehüllen und Wärmeversorgungspaketen können

- Investitionszuschüsse,
- zinsvergünstigte Darlehen mit Tilgungszuschuss sowie
- die steuerliche Abzugsfähigkeit energetischer Modernisierungen

eingesetzt werden. In diesem Abschnitt werden Investitionszuschüsse betrachtet, wobei der Barwert der Zinsvergünstigung von Darlehen, von Tilgungszuschüssen und der steuerlichen Abzugsfähigkeit implizit als Investitionszuschuss betrachtet wird.

6.2.3.1 Grundlagen und Problemstellung

Für die Ausgestaltung von Förderpaketen wird angenommen, dass Investitionszuschüsse für Maßnahmenpakete gewährt werden sollen, die im Vergleich zu den Mindestanforderungen bzw. dem Szenario *KW11* (vgl. Abschnitt 6.2.2) Vorteile in den Bereichen *Ressourcenschonung*, *Klimaschutz* und *Luftqualität* zulasten des *Wirtschaftlichen Wohlstands* aufweisen (vgl. Abschnitt 6.1). Zur Identifizierung von Maßnahmenpaketen, die den durch Förderung verfolgten Zielen gerecht werden, wird daher das Szenario *Staatssicht 11* definiert (vgl.

¹⁶¹ Diese wurden im Rahmen dieser Arbeit nicht umgesetzt.

Tabelle 114 in Abschnitt 7.3), in dem alle Akteure gemäß dem Entscheidungsansatz *Techno-ökonomischer Kompromiss* handeln. Letzterer entspricht aus Sicht der Gebäudeeigentümer einem Kompromiss¹⁶² aus der Dimension *Wirtschaftlichkeit* mit dem Entscheidungsansatz *Max Kapitalwert – Selbstnutztersicht* und der Dimension *Umwelt* mit dem Entscheidungsansatz *Technischer Kompromiss* (vgl. Abschnitt 5.4). Die Verschlechterung in der Dimension *Wirtschaftlichkeit* soll durch den Investitionszuschuss zumindest kompensiert werden. Priorität haben dabei aus Sicht des Staates Investitionszuschüsse für Maßnahmenpakete mit der größten Verbesserung in der Dimension *Umwelt* pro Investitionszuschuss. Der benötigte Investitionszuschuss wird auf Basis der Kapitalwertverschlechterung (aus Selbstnutztersicht) im Vergleich der Szenarien *KW11* und *Staatsicht 11* (jeweils Simulation bis 2030), ggf. zuzüglich einer Anreiz- oder Risikopauschale, bestimmt. Aufbauend auf dem Vergleich der Modellergebnisse für die beiden Szenarien können Förderpakete abgeleitet werden. Zur Erleichterung des Vorgehens werden basierend auf den Szenarien *KW11* und *Staatsicht 11* die Hilfsszenarien *KW11 MA*, und *Staatsicht 11 MA* definiert (vgl. Tabelle 114 in Abschnitt 7.3), die sich durch die Deaktivierung der Module Neubau, Abbruch und Haushaltsdynamik ergeben. Dadurch existieren in beiden Szenarien im Jahr 2030 dieselben Gebäude und Haushalte wie im Jahr 2006, was die Analyse erleichtert, da nicht zahlreiche Gebäude durch zufallsziehungsbedingte Abweichungen in den Entwicklungspfaden unvergleichbar werden.

Ein Förderpaket umfasse Anforderungen und den Fördersatz. Die Anforderungen seien analog zur Ausgestaltung von Mindestanforderungspaketen komponentenbezogen. Der Fördersatz soll anteilig in Bezug auf die Investitionshöhe [€/€] oder wohnflächenflächenbezogen [€/m²] vorgegeben werden. Es wird davon ausgegangen, dass die Fördersätze nicht von Haushaltseigenschaften abhängig sind. Die aktuelle Förderpraxis (vgl. Abschnitt 2.3.1) ist darauf ausge-

¹⁶² Die jeweiligen Gewichtungen (vgl. Abschnitt 5.4) verdeutlichen einen Zielkonflikt des Staates.

legt, dass der Gebäudeeigentümer zwischen mehreren Förderpaketen wählen kann. Diese Wahlfreiheit wird zwar in *AWOHM* bei Simulationen mit Förderungsspezifikationen gemäß Abschnitt 5.6.3 gewährt. Im Rahmen der folgenden Analyse wird jedoch davon ausgegangen, dass zu jedem Gebäude genau ein aus Staatssicht optimales Maßnahmenpaket – bezeichnet als Endzustand – existiert. Die Optimalität wird hierbei durch die Auswahl von Maßnahmenpaketen im Szenario *Staatssicht 11 MA* definiert. Soll jedes Gebäude genau einem Förderpaket zugeordnet werden, das genau einen Endzustand fördert, so können u. a. drei Fälle unterschieden werden:¹⁶³

- Fall A – Spezifikation eines Förderpakets für jedes Gebäude individuell
- Fall B – Spezifikation eines Förderpakets für jeden Endzustand, aber unabhängig vom Ausgangszustand, d. h. von den Gebäudeeigenschaften und dem Maßnahmenpaket vor der Sanierung
- Fall C – Spezifikation eines Förderpakets für jede Kombination aus Ausgangs- und Endzustand

Bei Fall A tritt, gemessen anhand des Kapitalwerts aus Selbstnutzersicht, keine Überförderung bzw. nur eine Überförderung in Höhe der Anreiz- oder Risikopauschale auf. Erreicht wird dies dadurch, dass die Höhe des Investitionszuschusses und damit der Fördersatz individuell bestimmt und gesetzt wird. Die Anzahl der Förderpakete entspricht jedoch der Gebäudeanzahl und ist damit nicht vertretbar.

Bei Fall B existieren so viele Förderpakete wie Endzustände. Zu jedem Förderpaket wird genau ein Fördersatz spezifiziert, bspw. ein anteiliger von 15% der Investition. Da ein Endzustand aber für unterschiedliche Ausgangszustände optimal sein kann, sind die zur Kompensation der Kapitalwertverschlechte-

¹⁶³ Ausgangs- und Endzustand sollten dabei hinreichend detailliert spezifiziert werden, damit sichergestellt ist, dass jeder Ausgangszustand einen eindeutigen Endzustand hat. Trotz dieser Anforderung umfasst ein Ausgangszustand meist mehrere Gebäude. Da bei hinreichender Detaillierung jedes Gebäude individuell ist, wären die Fälle A und C bei vollständiger Spezifizierung des Ausgangs- und Endzustands identisch.

rung notwendigen Investitionszuschüsse sowie die damit verbundenen Verbesserungen hinsichtlich der Dimension *Umwelt* heterogen. Soll der angestrebte Endzustand für jedes Gebäude eines Förderpakets wirtschaftlich sein, so muss unter den Gebäuden das Maximum des anteiligen bzw. flächenspezifischen Fördersatzes je Endzustand gewählt werden. Problematisch ist dabei, dass für einzelne Ausgangszustände zwar höhere Fördersätze gerechtfertigt sein können, sofern ihnen eine entsprechende Verbesserung in der Dimension *Umwelt* gegenübersteht. Werden die entsprechenden Fördersätze aber pauschal je Endzustand gewährt, so werden Gebäude mit niedrigeren erforderlichen Fördersätzen überfördert. Werden die Fördersätze niedriger angesetzt, so sinkt zwar die Überförderung, es wird aber nur für einen Teil der Gebäude der anvisierte Endzustand optimal. Es entsteht also bereits bei der Festlegung der Fördersätze einzelner Förderpakete ein Zielkonflikt zwischen der Überförderung und Verbesserungen in der Dimension *Umwelt*.

Bei Fall C wird zu jeder Ausgangszustand-Endzustands-Kombination ein Förderpaket definiert. Diese Förderpakete sind homogener als bei reiner Förderung des Endzustands (Fall B) und heterogener als bei individueller Förderung je Gebäude (Fall A). Entsprechend ist die Überförderung *ceteris paribus* geringer als in Fall B. Die Heterogenität innerhalb der Förderpakete sinkt mit zunehmender Präzision der Spezifikation von Ausgangs- und Endzuständen, mit zunehmender Präzision steigt aber auch die Anzahl an unterschiedlichen Ausgangs- und Endzuständen und damit an Förderpaketen.

Gemäß obiger Argumentation gibt es bei der Ausgestaltung von Förderpaketen aus Staatssicht folgende konfligierende Zielsetzungen:

- Minimierung der Förderpaketanzahl
- Minimierung der Überförderung
- Maximierung der kumulierten Verbesserung in der Dimension *Umwelt*

6.2.3.2 Ansatz zum Design von Förderpaketen

Im Folgenden wird ein Ansatz zur strukturierten Ausgestaltung aufeinander abgestimmter Förderpakete vorgestellt. Dieser zielt auf einen Kompromiss zwischen den drei Zielsetzungen ab und gliedert sich in sieben Schritte:

1. Szenarioauswahl
2. Bestimmung der Kombinationen von Ausgangs- und Endzuständen
3. Bestimmung der mittleren Förderausgaben pro Umweltverbesserung in Abhängigkeit von der kumulierten Umweltverbesserung
4. Auswahl einer Kombination von mittleren Förderausgaben pro Umweltverbesserung und kumulierter Umweltverbesserung
5. Bestimmung des Ausnutzungsgrades der Umweltverbesserung in Abhängigkeit von der Förderpaketanzahl
6. Auswahl von Förderpaketanzahl und -spezifikation
7. Transformation der Förderpaketspezifikation in eine anwendungsorientierte Form

6.2.3.2.1 Szenarioauswahl

Die anzustrebenden Endzustände, d. h. die Maßnahmenpakete, deren Umsetzung durch die Förderpakete unterstützt werden soll, werden über das Szenario *Staatssicht 11 MA* definiert. Unter der Annahme, dass Akteure gemäß Kapitalwert aus Selbstnutzersicht entscheiden, erfordert der Übergang vom Szenario *KW11 MA* zu diesem Szenario Förderausgaben, die der Kapitalwertverschlechterung aus Selbstnutzersicht (zzgl. einer etwaigen Anreiz- oder Risikopauschale) entsprechen. Werden sonstige volkswirtschaftliche Effekte vernachlässigt, so stehen diese Förderausgaben der Umweltverbesserung, definiert als Verbesserung in der Dimension *Umwelt* aus Gebäudeeigentümersicht, als Kapitalwertverschlechterung der aus Staat, Eigentümer und Mieter bestehenden Gruppe gegenüber. Die Definition des Szenarios *Staatssicht 11 MA* beinhaltet damit bereits einen Kompromiss zwischen Förderausgaben und Umweltverbesserung.

6.2.3.2.2 Bestimmung der Kombinationen von Ausgangs- und Endzuständen

Die Spezifikation von Ausgangs- und Endzuständen erfolgt basierend auf den Ergebnissen der Simulation des Szenarios *Staatsicht 11 MA*. Wichtig ist dabei die Interpretierbarkeit der Zustände. Sowohl Ausgangs- als auch Endzustand werden daher, wie in Tabelle 93 dargestellt, anhand von komponentenbezogenen Qualitätsstufen für die Gebäudehülle und einer Typisierung von Wärmeversorgungspaketen über die eingesetzten Energieträger spezifiziert. Bei der vorgeschlagenen Typisierung können maximal 207.360 ($12*12*12*12*10$) unterschiedliche Ausgangszustände und 2.560 ($4*4*4*4*10$) unterschiedliche Endzustände auftreten.¹⁶⁴

Tabelle 93: Merkmale zur Spezifikation von Ausgangs- und Endzustand für die Förderpaketdefinition (vgl. Abschnitt 5.3.7 bez. der Qualitätsstufen)

Merkmale		Ausprägungen beim Ausgangszustand	Ausprägungen beim Endzustand	Skalenniveau
Qualitätsstufen Gebäudehülle	Ob. Gebäudeabschluss	0 (Urzustand), 1, ..., 11	0 (beibehalten), 9, 10, 11	Ordinal
	Wand	0 (Urzustand), 1, ..., 11	0 (beibehalten), 9, 10, 11	Ordinal
	Fenster	0 (Urzustand), 1, ..., 11	0 (beibehalten), 9, 10, 11	Ordinal
	Unt. Gebäudeabschluss	0 (Urzustand), 1, ..., 11	0 (beibehalten), 9, 10, 11	Ordinal
Typisierung der Wärmeversorgungspakete anhand der eingesetzten Energieträger (geordnet nach zunehmender Bereitschaft für Wechsel des Hauptenergieträgers)		1 (Fernwärme), 2 (Fernwärme/solar), 3 (Gas), 4 (Gas/solar), 5 (Heizöl), 6 (Heizöl/solar), 7 (Holz(pellets)), 8 (Holz(pellets)/solar), 9 (Sonstige fossile Energieträger), 10 (Sonstige fossile Energieträger/solar)		Ordinal

6.2.3.2.3 Bestimmung der mittleren Förderausgaben pro Umweltverbesserung in Abhängigkeit von der kumulierten Umweltverbesserung

Für jede auftretende Kombination aus Ausgangs- und Endzustand können für die entsprechenden Gebäude die mit dem Übergang vom Szenario *KW11 MA* zum Szenario *Staatsicht 11 MA* verbundenen Differenzen der Bewertungen aus Eigentümersicht in den Dimensionen *Umwelt* und *Wirtschaftlichkeit* (vgl. Ka-

¹⁶⁴ Auf eine Differenzierung nach der Gebäudegröße und anderen Merkmalen wurde verzichtet, um die Komplexität bzw. die Anzahl möglicher Kombinationen nicht weiter zu erhöhen. Eine derartige Differenzierung kann aber prinzipiell in den Ansatz integriert werden, bspw. wie in Abschnitt 6.2.2.

pitel 5) bestimmt werden. Wegen der Anschaulichkeit werden diese Differenzen im Folgenden vor der Normierung betrachtet und beschränken sich in der Dimension *Umwelt*¹⁶⁵ auf die CO₂-Emissionen (inkl. Emissionen aus Biomasse)¹⁶⁶. Für die Betrachtung mehrerer Indikatoren müssten diese *ceteris paribus* gemäß der Bewertung aus Staatssicht (vgl. Abschnitt 6.1) gewichtet und aggregiert werden.

Basierend auf den in Tabelle 94 auf Gebäudeebene spezifizierten Variablen werden mittlere Förderausgaben pro CO₂-Vermeidung [€/t] in Abhängigkeit von der kumulierten CO₂-Vermeidung [t] abgeleitet. Die diesem funktionalen Zusammenhang entsprechenden Kurven können nach dem ebenfalls in Tabelle 94 spezifizierten Schema zunächst separat für jede Kombination aus Ausgangs- und Endzustand erzeugt und anschließend für mehrere Förderpakete bzw. Endzustände aggregiert werden. Das Schema ist ebenfalls anwendbar, wenn mehrere einem Endzustand zugeordnete Ausgangszustände in einem Förderpaket zusammengefasst oder bestimmte Kombinationen von Ausgangs- und Endzuständen eliminiert werden. Auf eine Diskontierung der Förderausgaben und der CO₂-Vermeidung wird bei dem Schema verzichtet. Die Anreiz- oder Risikopauschale wird im Folgenden nicht berücksichtigt.

Für die Aggregation der gebäudespezifischen Ergebnisse werden in Tabelle 94 drei grundlegende Varianten betrachtet: die individuelle Förderung, die anteilige Förderung und die (wohn)flächenbezogene Förderung. Bei der aufgrund der hohen Förderpaketanzahl nicht praktikablen¹⁶⁷ individuellen Förderung tritt keine Überförderung auf. Die zugehörigen Kurven können daher als Refe-

¹⁶⁵ In der Dimension *Wirtschaftlichkeit* wird in den Szenarien *Staatssicht 11 MA* und *KW11 MA* ohnehin nur der *Kapitalwert aus Selbstnutzersicht* betrachtet.

¹⁶⁶ Vgl. Fußnote 187 und Abschnitt 8.2 bez. indirekter Emissionen. Diese werden in *AWOHH* nicht berücksichtigt.

¹⁶⁷ Alternativ könnte die Spezifikation bei obligatorischer Wirtschaftlichkeitsrechnung auf wirtschaftlicher Ebene erfolgen. Eine Wirtschaftlichkeitsrechnung bedarf allerdings klarer Vorgaben und weist eine hohe Komplexität sowie zahlreiche Beeinflussungsmöglichkeiten auf.

renz herangezogen werden. Bei anteiliger Förderung wird sukzessive ein steigender Fördersatz vorgegeben. Dadurch wird der jeweilige Endzustand für eine steigende Anzahl an Gebäuden wirtschaftlich, sodass die kumulierte CO₂-Vermeidung steigt.

Die mittleren Förderausgaben pro CO₂-Vermeidung steigen aber nicht notwendigerweise monoton, da bei einem höheren notwendigen Fördersatz überproportional steigende CO₂-Vermeidungen möglich sind. Daher können die Kurven bei anteiliger Förderung auch fallen. Fallen die Kurven stückweise, so werden allerdings Punkte in dem Sinne dominiert, dass mit niedrigeren mittleren Förderausgaben pro CO₂-Vermeidung eine größere kumulierte CO₂-Vermeidung möglich ist. Daher werden derartige Punkte eliminiert, indem für jeden Punkt der Kurve die mittleren Förderausgaben pro CO₂-Vermeidung auf das Minimum der entsprechenden Werte von Punkten mit einer größeren kumulierten CO₂-Vermeidung gesetzt werden, sofern dieses kleiner ist. Das Vorgehen bei der flächenbezogenen Förderung ist analog zur anteiligen Förderung. Auch dabei kann es notwendig sein, dominierte Punkte zu eliminieren.

Basierend auf den Kurven bei anteiliger und flächenbezogener Förderung kann eine Kurve bei wahlweise anteiliger oder flächenbezogener Förderung bestimmt werden. Bei dieser wird angenommen, dass eine kumulierte CO₂-Vermeidung mit dem Minimum der beiden mittleren Förderausgaben pro CO₂-Vermeidung erreicht werden kann. Dies ist möglich, wenn aus Staatssicht jeweils der effizientere Fördermechanismus eingesetzt wird.

Tabelle 94: Schema zur Bestimmung der mittleren Förderausgaben pro CO₂-Vermeidung in Abhängigkeit von der kumulierten CO₂-Vermeidung bei individueller, anteiliger und flächenbezogener Förderung

Ebene	Variablenkategorie	Variable	Anmerkung	
Gebäudeebene	Gebäudeeigenschaften	Wohnfläche [m ²]	-	
	Scenario <i>Staatsstrich 11 MA</i> im Vergleich zum Scenario <i>KW 11 MA</i>	CO ₂ -Vermeidung [t]	Differenz basierend auf U ₀ , multipliziert mit der Wohnfläche und der Lebensdauer 7H von gebäudeklimatischen	
	Scenario Staatsstrich 11 MA	Kapitalwertverschlechterung aus Selbstnutzersicht [€]	Differenz basierend auf dem Kapitalwert aus Selbstnutzersicht O ₀ (vgl. Abschnitt 5.4.3)	
	Angeleitete Variablen	Investition [€]	Entspricht O ₁ (vgl. Abschnitt 5.4.3)	
		Notwendiger Investitionszuschluss [€]	Kapitalwertverschlechterung aus Selbstnutzersicht	
	Angeleitete Variablen	Notwendiger anteiliger Fördersatz [€/€]	Notw. Investitionszuschluss / Investition	
		Notw. flächenbezogener Fördersatz [€/m ²]	Notw. Investitionszuschluss / Wohnfläche	
	Angeleitete Variablen	Förderung bei individueller Förderung [€]	Notwendiger Investitionszuschluss	
		Förderung bei anteiliger Förderung [€]	Anteiliger Fördersatz * Investition	
	Angeleitete Variablen	Förderung bei flächenbez. Förderung [€]	Flächenbezogener Fördersatz * Wohnfläche	
Notw. Förderausg. pro CO ₂ -Vermeidung [€/t]		Notw. Investitionszuschluss / CO ₂ -Vermeidung		
Gebäudeebene	Kurve: Mittlere Förderausgaben pro CO ₂ -Vermeidung bei individueller Förderung (Gebäude geordnet nach aufsteigenden notwendigen Förderausgaben pro CO ₂ -Vermeidung)	x-Achse: kumulierte CO ₂ -Vermeidung [t]	Summe der CO ₂ -Vermeidung der ersten n Gebäude	
		y-Achse: Mittlere Förderausgaben pro CO ₂ -Vermeidung [€/t]	Summe der Förderungen der ersten n Gebäude bei individueller Förderung / Summe der CO ₂ -Vermeidung der ersten n Gebäude	
	Kurve: Mittlere Förderausgaben pro CO ₂ -Vermeidung bei anteiliger Förderung. (Gebäude geordnet nach aufsteigendem notwendigen anteiligen Fördersatz)	x-Achse: kumulierte CO ₂ -Vermeidung [t]	Summe der CO ₂ -Vermeidung der ersten n Gebäude	
		y-Achse: Mittlere Förderausgaben pro CO ₂ -Vermeidung [€/t]	Summe der Förderungen der ersten n Gebäude bei anteiliger Förderung / Summe der CO ₂ -Vermeidung der ersten n Gebäude	
	Kurve: Mittlere Förderausgaben pro CO ₂ -Vermeidung in Abh. von der kumul. CO ₂ -Vermeidung bei flächenbezogener Förderung (Gebäude geordnet nach aufsteigendem notw. flächenbez. Fördersatz)	x-Achse: kumulierte CO ₂ -Vermeidung [t]	Summe der CO ₂ -Vermeidung der ersten n Gebäude	
		y-Achse: Mittlere Förderausgaben pro CO ₂ -Vermeidung [€/t]	Summe der Förderungen der ersten n Gebäude bei flächenbezogener Förderung / Summe der CO ₂ -Vermeidung der ersten n Gebäude	
	Förderpaket mit genau einem Endzustand (ein oder mehrere Ausgangszustände sind möglich)	Kurve: Mittlere Förderausgaben pro CO ₂ -Vermeidung in Abh. von der kumul. CO ₂ -Vermeidung bei wahlweise anteiliger oder flächenbez. Förderung	Die y-Werte der Kurve entsprechen dem Minimum der Kurven bei prozentualer und bei flächenbezogener Förderung nach der Elimination dominanter Punkte.	Summe der y-Werte der Kurven bei prozentualer und bei flächenbezogener Förderung
	Mehrere Förderpakete	Kurve: Mittlere Förderausgaben pro CO ₂ -Vermeidung in Abh. von der kumul. CO ₂ -Vermeidung	x-Achse: kumulierte CO ₂ -Vermeidung [t]	Summe der CO ₂ -Vermeidung der Kurven der einzelnen Förderpakete zu den vorgegebenen mittleren Förderausgaben pro CO ₂ -Vermeidung
			y-Achse: Mittlere Förderausgaben pro CO ₂ -Vermeidung [€/t]	Beliebiger nicht-negativer Wert

6.2.3.2.4 Auswahl einer Kombination von mittleren Förderausgaben pro Umweltverbesserung und kumulierter Umweltverbesserung

Nach der Bestimmung der mittleren Förderausgaben pro Umweltverbesserung in Abhängigkeit von der kumulierten Umweltverbesserung als Aggregation aller Ausgangs-Endzustands-Kombinationen bei wahlweise anteiliger oder flächenbezogener Förderung muss ein aus Staatssicht anzuvisierender Punkt dieser Kurve gewählt werden. Die Auswahl kann durch Vorgabe einer kumulierten Umweltverbesserung¹⁶⁸ bzw. CO₂-Vermeidung, von mittleren Förderausgaben pro Umweltverbesserung bzw. CO₂-Vermeidung oder des Förderbudgets strukturiert werden. Bspw. können Förderpakete angestrebt werden, deren mittlere Förderausgaben pro CO₂-Vermeidung den Schätzungen von Schadenskosten für CO₂ (vgl. Schwermer, 2007) entsprechen, wovon im Folgenden ausgegangen wird.

6.2.3.2.5 Bestimmung des Ausnutzungsgrades der Umweltverbesserung in Abhängigkeit von der Förderpaketanzahl

Die Ausgestaltung der Förderpakete erfolgt im Folgenden unter der Annahme, dass alle Gebäudeeigentümer gemäß dem Kapitalwert aus Selbstnutzersicht entscheiden. Der anvisierte Zielpunkt umfasst eine kumulierte Umweltverbesserung bzw. CO₂-Vermeidung und mittlere Förderausgaben pro Umweltverbesserung bzw. CO₂-Vermeidung. Wird zu jeder Ausgangs-Endzustands-Kombination ein eigenes Förderpaket definiert, so ist der anvisierte Punkt erreichbar. Soll die daraus resultierende Anzahl an Förderpaketen reduziert werden, bspw. um eine entsprechende Förderpaketspezifikation realisierbarer zu machen, so müssen

- Förderpakete eliminiert oder
- Förderpakete mit demselben Endzustand zusammengelegt

¹⁶⁸ Hierbei ist zu berücksichtigen, dass die Hochrechnungsfaktoren des SUF des Mikrozensus 2006 noch nicht in das vorgeschlagene Schema eingehen.

werden. Sollen dabei die mittleren Förderausgaben pro CO₂-Vermeidung konstant bleiben, so sinkt durch die Reduktion der Förderpaketanzahl die kumulierte CO₂-Vermeidung. Das Verhältnis aus dieser reduzierten kumulierten CO₂-Vermeidung und der anvisierten CO₂-Vermeidung wird im Folgenden als Ausnutzungsgrad bezeichnet. Für die strukturierte Reduktion der Förderpaketanzahl werden die zwei Methoden *reine Elimination* sowie *Zusammenlegung und Auswahl* eingesetzt.

Reine Elimination

Ausgehend von einem Förderpaket je Ausgangs-Endzustands-Kombination werden sukzessive die Förderpakete mit der niedrigsten kumulierten CO₂-Vermeidung bei den vorgegebenen mittleren Förderausgaben pro CO₂-Vermeidung eliminiert. Somit erhält man für jede Förderpaketanzahl eine eindeutige Menge an Förderpaketen sowie die zugehörige kumulierte CO₂-Vermeidung und damit den Ausnutzungsgrad.

Zusammenlegung und Auswahl

Ausgehend von einer leeren Menge von Förderpaketen werden sukzessive Förderpakete mit der höchsten kumulierten CO₂-Vermeidung in die Menge von Förderpaketen aufgenommen. Als Vorbereitung werden zunächst für jeden Endzustand z mit N_z Ausgangszuständen N_z Clusteranalysen (Erläuterung folgt weiter unten) durchgeführt. Diese Clusteranalysen gruppieren die Ausgangszustände (und damit die zugehörigen Gebäude) mit Endzustand z dabei in $1, 2, \dots, N_z$ Cluster.¹⁶⁹ Insgesamt ergeben sich damit $N_z * (N_z + 1)/2$ Cluster und damit potenzielle Förderpakete je Endzustand z . Für jeden dieser Cluster kann gemäß dem Schema in Tabelle 94 die kumulierte CO₂-Vermeidung bei den vorgegebenen mittleren Förderausgaben pro CO₂-Vermeidung bestimmt werden. Für jede der N_z Clusteranalysen eines Endzustands z werden die Cluster nach absteigender kumulierter CO₂-Vermeidung sortiert. Anschließend

¹⁶⁹ Da die *Bündelung von Ausgangszuständen* im Vordergrund steht, wurde die Clusteranalyse als Analyseverfahren gewählt (vgl. Backhaus u. a. 2003).

werden zu der kumulierten CO₂-Vermeidung jedes Clusters die kumulierten CO₂-Vermeidungen seiner Vorgänger derselben Clusteranalyse addiert. Somit ergibt sich bspw. für den vierten Cluster einer Clusteranalyse die Summe der kumulierten CO₂-Vermeidung der vier Cluster mit der höchsten kumulierten CO₂-Vermeidung. Daher können zu einem Endzustand z die n Förderpakete mit der höchsten Summe kumulierter CO₂-Vermeidungen identifiziert werden, indem die Cluster und Förderpakete zum Maximum der n -ten Cluster gewählt werden. Mit den Maxima der 1., 2., ..., N_z -ten Cluster erhält man somit die Summe der kumulierten CO₂-Vermeidungen in Abhängigkeit von der Förderpaketanzahl für jeden Endzustand z . Damit kann für jeden Endzustand die zusätzliche kumulierte CO₂-Vermeidung eines zusätzlichen Förderpakets mit diesem Endzustand bestimmt werden. Insgesamt kann basierend auf diesen in absteigender Reihenfolge zu ordnenden zusätzlichen kumulierten CO₂-Vermeidungen über alle Endzustände hinweg zu jeder Förderpaketanzahl die Menge an Clustern und damit Förderpaketen identifiziert werden, die zur höchsten Summe kumulierter CO₂-Vermeidungen basierend auf den identifizierten Clustern führt.¹⁷⁰ Zu diesen kann dann auch der Ausnutzungsgrad bestimmt werden.

Im Folgenden wird die in der Methode *Zusammenlegung und Auswahl* angewandte Clusteranalyse erläutert. Das Vorgehen orientiert sich wiederum an den acht Schritten eines Schemas für die Anwendung der Clusteranalyse, das von Backhaus u. a. (2003) erläutert wurde.

Problemstellung: Ziel der Anwendung der Clusteranalyse ist die Zusammenfassung von Ausgangszuständen (und damit der zugehörigen Gebäude), die im

¹⁷⁰ Das Vorgehen basiert auf der Annahme, dass die zusätzliche CO₂-Vermeidung eines Endzustands mit der Förderpaketanzahl sinkt. Ist dies nicht der Fall, so ist die Menge der Förderpakete nicht zulässig und die Summe kumulierter CO₂-Vermeidungen stellt (nur) eine obere Schranke dar. Zulässige Kombinationen lassen sich durch vollständige Enumeration ableiten. Diese erfordert aber hohe Laufzeiten, sodass dieser das beschriebene Verfahren mit anschließender Überprüfung der Zulässigkeit der Förderpakete vorgezogen wird.

Szenario *Staatssicht 11 MA* denselben Endzustand aufweisen, in einem Förderpaket. Dabei sollen „ähnliche“ Ausgangszustände und „ähnliche“ anteilige bzw. flächenbezogene Fördersätze bei vorgegebenen mittleren Förderausgaben pro CO₂-Vermeidung zusammengefasst werden. Dadurch sollen einerseits die Ausgangszustände auch für die Cluster inhaltlich spezifizierbar bleiben und andererseits Überförderungen vermieden bzw. die kumulierte CO₂-Vermeidung bei vorgegebenen mittleren Förderausgaben pro CO₂-Vermeidung maximiert werden.

Zu klassifizierende Objekte: Die zu klassifizierenden Objekte sind die Ausgangszustände zu einem Endzustand. Darüber werden implizit auch die Gebäude mit den jeweiligen Ausgangszuständen Clustern zugeordnet.

Variablenauswahl: Als Variablen werden für die Charakterisierung des Ausgangszustands komponentenbezogene Qualitätsstufen der Gebäudehülle (ordinal) sowie eine die Wärmeversorgungspakete typisierende Variable herangezogen (vgl. Tabelle 93). Letztere repräsentiert basierend auf den Wärmeversorgungspaketten (nominal) auch die Bereitschaft für einen Wechsel des Hauptenergieträgers (ordinal). Es wird angenommen, dass diese Wechselbereitschaft ausgehend von Fernwärme über Gas, Heizöl, Holz (im Bestand meist keine Pellets) bis zu sonstigen fossilen Energieträgern (Elektrizität exkl. Wärmepumpenstrom, Braunkohlebriketts, Steinkohle(koks)) zunimmt. Zudem wird je Ausgangszustand der zu der vorgegebenen mittleren Förderausgabe pro CO₂-Vermeidung gehörende Fördersatz, entweder anteilig [€/€] oder flächenbezogen [€/m²], als metrische Variable berücksichtigt. Je kleiner die Abweichung zwischen den Förderhöhen ist, desto kleiner ist das Absinken der kumulierten CO₂-Minderung bei vorgegebenen mittleren Förderausgaben je CO₂-Vermeidung, falls die Ausgangszustände in einem Förderpaket zusammengelegt werden. Die ordinalen Merkmale werden wie metrische Variablen

behandelt.¹⁷¹ Alle Variablen werden mittels z-Transformation auf einen Mittelwert von 0 und eine Varianz von 1 standardisiert.

Proximitätsmaß: Siehe Abschnitt 6.2.2.

Fusionierungsalgorithmus: Siehe Abschnitt 6.2.2.

Clusteranzahl: Die Clusteranalyse wird sukzessive für eine Clusteranzahl von eins bis zur Anzahl der Ausgangszustände je Endzustand und damit der Anzahl der zu clusternden Objekte durchgeführt. Für jeden dieser Cluster wird basierend auf den zugehörigen Gebäuden gemäß dem Schema in Tabelle 94 die kumulierte CO₂-Vermeidung bei den vorgegebenen mittleren Förderausgaben pro CO₂-Vermeidung bestimmt. Die Auswahl der Förderpakete und damit der Clusteranzahl erfolgt dann gemäß der Beschreibung zur Methode *Zusammenlegung und Auswahl* (siehe weiter vorne).

Clusterbildung: Die Anwendung der Clusteranalyse erfolgt in Kapitel 7.

Analyse und Interpretation: Auf die Analyse und Interpretation der Cluster wird unter „Transformation der Förderpaketspezifikation in eine anwendungsorientierte Form“ eingegangen (siehe Abschnitt 6.2.3.2.7).

6.2.3.2.6 Auswahl von Förderpaketanzahl und -spezifikation

Insgesamt ergeben sich für die beiden Methoden *reine Elimination* sowie *Zusammenlegung und Auswahl* Ausnutzungsgrade in Abhängigkeit von der Förderpaketanzahl. Dadurch können bei vorgegebenen mittleren Förderausgaben pro CO₂-Vermeidung der Kompromiss zwischen Förderpaketanzahl und kumulierten CO₂-Emissionen quantitativ aufgezeigt und die zugehörigen Cluster identifiziert werden. Die einfachere Methode *reine Elimination* führt dabei bei gleicher Förderpaketanzahl zu kleineren oder maximal identischen Ausnutzungsgraden. Allerdings ist neben der Methode auch die Transformation der Förderpaketspezifikation von Clustern in eine anwendungsorientierte Form

¹⁷¹ Ordinale Merkmale werden in der Praxis nach Müller (2004) häufig als metrische Merkmale interpretiert.

bei der Methode *Zusammenlegung und Auswahl* aufwändiger. Daher sollte bei der Auswahl eines Kompromisses aus Förderpaketanzahl und Ausnutzungsgrad auch die Transformierbarkeit der Cluster, die im folgenden Abschnitt diskutiert wird, berücksichtigt werden.

6.2.3.2.7 Transformation der Förderpaketspezifikation in eine anwendungsorientierte Form

Die identifizierten Cluster umfassen mindestens einen Ausgangszustand und damit jeweils mehrere Einzelgebäude. Der Endzustand ist dabei eindeutig. Die Ausgangszustände sind sich hingegen nur „ähnlich“. Daher müssen die Ausgangszustände, falls ein Cluster mehr als einen Ausgangszustand umfasst, bspw. durch Angabe von komponentenbezogenen Qualitätsstufenintervallen für die Gebäudehülle so spezifiziert werden, dass diese Spezifikation möglichst alle Ausgangszustände dieses Clusters und keine Ausgangszustände anderer Cluster umfasst. Durch diese Transformation werden die Förderpaketspezifikationen in eine anwendungsorientierte, d. h. leicht verständliche, Form gebracht.¹⁷² In Kapitel 7 wird basierend auf den identifizierten Clustern beispielhaft auf eine derartige Transformation eingegangen.

6.2.4 Zielgruppenadaption umweltpolitischer Instrumente

In den Abschnitten 6.2.2 und 6.2.3 wurden Ansätze zur Ausgestaltung von Mindestanforderungs- und Förderpaketen entwickelt. Die Ausgestaltung dieser umweltpolitischen Instrumente basiert dabei auf den Annahmen, dass zumindest von einem Teil der Gebäudeeigentümer die Mindestanforderungen umgesetzt werden und über einen Wechsel zu einem geförderten Maßnahmenpaket auf Basis des Kapitalwerts aus Selbstnutzersicht entschieden wird. Der Umsetzung der mit den Mindestanforderungen und Förderpaketen anvisierten Maßnahmenpakete und den damit verbundenen Umweltverbesserungspotenzialen stehen allerdings vielfältige Hemmnisse gegenüber. Diese

¹⁷² Hierbei könnten ggf. ebenfalls statistische Analyseverfahren angewendet werden. Dies ist allerdings nicht mehr Betrachtungsgegenstand dieser Arbeit.

umfassen einerseits die in den Abschnitten 6.2.2 und 6.2.3 erläuterte Notwendigkeit anwendungsorientierter Spezifikationen. Andererseits erschweren bzw. verhindern auch bspw. Informationsdefizite, Finanzierungsprobleme, kurze Planungshorizonte, mangelnde Akzeptanz von Kaltmietenerhöhungen, das Investor-Nutzer-Dilemma und Sanierungsunwilligkeit (vgl. Kapitel 4) die Umsetzung der angestrebten Maßnahmenpakete. Während die Umweltverbesserungspotenziale neben dem Nutzerverhalten überwiegend durch die Gebäudeeigenschaften determiniert werden, sind die Hemmnisse auch von den Charakteristika der Gebäudeeigentümer und -bewohner sowie von der Art der umweltpolitischen Instrumente abhängig.

Im Folgenden wird ein Ansatz vorgestellt, mit dem die u. a. mit den Mindestanforderungen und Investitionszuschüssen anvisierten Umweltverbesserungspotenziale konkreten Gruppen von Gebäudeeigentümern und -bewohnern zugeordnet werden können. Die Gebäudeeigentümer und -bewohner werden dabei anhand von Merkmalen charakterisiert, die entweder mit den erwähnten Hemmnissen oder ihrer Eignung für bestimmte Arten von umweltpolitischen Instrumenten in Zusammenhang stehen. Somit können Zielgruppen (aus Staatssicht) mit ihren Potenzialen und drohenden Hemmnissen identifiziert sowie umweltpolitische Instrumente zielgruppenorientiert gebündelt, angepasst und priorisiert werden. Da die *Bündelung von Haushalten* im Vordergrund steht, wurde die Clusteranalyse als Analyseverfahren gewählt (vgl. Backhaus u. a. 2003).

Problemstellung: Ziel der Anwendung der Clusteranalyse ist die Gruppierung von Gebäudeeigentümern und -bewohnern (und damit der zugehörigen Gebäude) für das Szenario *Staatssicht 11* bzw. das Hilfsszenario *Staatssicht 11 MA*¹⁷³ (vgl. Abschnitt 6.2.3). Die Gruppierung soll Eigentümer und Bewohner

¹⁷³ Durch die Deaktivierung des Moduls Haushaltsdynamik beziehen sich die Aussagen auf die Haushalte und Haushaltseigenschaften zum Startjahr der Simulation, d. h. die Zielgruppen, die in naher Zukunft durch die Instrumente erreicht werden müssen.

mit ähnlichen Eigenschaften in Bezug auf die Eignung umweltpolitischer Instrumente und das Auftreten von Hemmnissen sowie mit ähnlichen Umweltverbesserungspotenzialen zusammenfassen. Dadurch sollen Zielgruppen identifiziert werden, die priorisiert und für die umweltpolitische Instrumente geeignet angepasst und gebündelt werden können. Grundsätzlich müssen dabei Selbstnutzer und (Ver-)Mieter unterschieden werden, für die separate Clusteranalysen durchgeführt werden.

Zu klassifizierende Objekte: Die zu klassifizierenden Objekte entsprechen allen Haushalten aus *AWOHH*. Dadurch werden implizit auch die von Ihnen bewohnten Gebäude gruppiert. Die Vermieter werden nur indirekt über die Mieter und die von Ihnen bewohnten Gebäude als Zielgruppe betrachtet.

Variablenauswahl: Bei der Clusteranalyse sollen das Auftreten von Hemmnissen, die Eignung umweltpolitischer Instrumente und Umweltverbesserungspotenziale berücksichtigt werden. Die Relevanz ausgewählter Merkmale in Bezug auf das Auftreten von Hemmnissen und die Eignung umweltpolitischer Instrumente ist in Tabelle 95 dargestellt. Die Clusteranalyse wird jeweils separat für Selbstnutzer und Mieter durchgeführt. Haushaltsnettoeinkommen, Grenzsteuersatz, Alter und Bildungsgrad des Haushaltsvorstands, Investition sowie die notwendige Förderung werden für die Clusteranalyse als Variablen herangezogen. Resultierende Cluster können somit indirekt hinsichtlich drohender Hemmnisse wie Finanzierungsproblemen, Sanierungsunwilligkeit, kurzen Planungshorizonten, mangelnder Akzeptanz bzw. Tragbarkeit von Kaltmietenerhöhungen und Informationsdefiziten als möglichst homogene Gruppen charakterisiert werden. Darauf basierend können sie hinsichtlich der Eignung von steuerlicher Abzugsfähigkeit, Krediten, Investitionszuschüssen, Mindestanforderungen, größerer Flexibilität bei Mieterhöhungen und Informationskampagnen charakterisiert sowie diese Instrumente angepasst und ggf. zielgruppenorientiert gebündelt werden. Um die Zielgruppen priorisieren zu können, werden auch Variablen in die Clusteranalyse mit einbezogen, die die Höhe des Umweltverbesserungspotenzials charakterisieren. Neben dem Umweltverbes-

serungspotenzial pro Haushalt ist auch das Gesamtpotenzial je Cluster für die Priorisierung der Zielgruppen aus Staatssicht relevant. Dies kann allerdings nicht als Variable in die Clusterung eingehen, sondern ergibt sich als Ergebnis der Clusteranalyse. In Bezug auf die Umweltverbesserung werden wiederum aus Gründen der Übersichtlichkeit nur die CO₂-Emissionen¹⁷⁴ betrachtet. Tabelle 96 fasst die in die Clusteranalyse eingehenden Variablen zusammen. Diese umfassen sechs metrische und eine ordinale Variable, die als metrische Variable behandelt wird.¹⁷⁵ Die Variablen werden mittels z-Transformation auf einen Mittelwert von 0 und eine Varianz von 1 standardisiert.

Tabelle 95: Relevanz ausgewählter Merkmale in Bezug auf das Auftreten von Hemmnissen und die Eignung umweltpolitischer Instrumente

Merkmalskategorie	Merkmal	Relevanz in Bezug auf	
		Auftreten von Hemmnissen	Eignung umweltpolitischer Instrumente
Gebäudeeigentümer/-bewohner	Eigentumsstatus	Sanierungswilligkeit, Investor-Nutzer-Dilemma	Steuerliche Abzugsfähigkeit, größere Flexibilität bei Mieterhöhungen
	Haushaltsnettoeinkommen	Finanzierungsprobleme, mangelnde Akzeptanz/Tragbarkeit von Kaltmietenerhöhungen	Kredit, größere Flexibilität bei Mieterhöhungen
	Grenzsteuersatz	-	Steuerliche Abzugsfähigkeit
	Alter des Haushaltsvorstands	Finanzierungsprobleme, Sanierungsunwilligkeit, kurzer Planungshorizont, Informationsdefizite, mangelnde Akzeptanz von Kaltmietenerhöhungen	Informationskampagnen, Kredit, Mindestanforderungen, Investitionszuschuss
Gebäude	Bildungsgrad des Haushaltsvorstands	Sanierungsunwilligkeit, Informationsdefizite, mangelnde Akzeptanz von Kaltmietenerhöhungen	Informationskampagnen
	Investition	Finanzierungsprobleme, Sanierungsunwilligkeit, mangelnde Akzeptanz/Tragbarkeit von Kaltmietenerhöhungen	Kredit
	Notwendige Förderung	Sanierungsunwilligkeit, Finanzierungsprobleme	Investitionszuschuss, Kredit, steuerliche Abzugsfähigkeit

Proximitätsmaß: Siehe Abschnitt 6.2.2.

Fusionierungsalgorithmus: Siehe Abschnitt 6.2.2.

Clusteranzahl: Der Differenzierungsgrad der Zielgruppen wird durch die Clusteranzahl bestimmt. Eine Clusteranalyse wird sukzessive für eine Clusteran-

¹⁷⁴ Vgl. Fußnote 187 und Abschnitt 8.2 bez. indirekter Emissionen. Diese werden in *AWOHM* nicht berücksichtigt.

¹⁷⁵ Ordinale Merkmale werden in der Praxis nach Müller (2004) häufig als metrische Merkmale interpretiert.

zahl von 1, 2, ..., N durchgeführt. Somit erhält man für jede Clusteranzahl ein Heterogenitätsmaß. Die Auswahl der vielversprechendsten Clusteranzahl erfolgt in Abhängigkeit von den Ergebnissen anhand des Ellbogenkriteriums (vgl. Backhaus u. a. 2003).

Tabelle 96: Variablen für die Zielgruppenadaption umweltpolitischer Instrumente mittels einer Clusteranalyse; *: energiebedingte Mehrinvestition in die Gebäudehülle und Gesamtinvestition in das Wärmeversorgungspaket¹⁷⁶

Variablenkategorie	Variable	Einheit	Skalenniveau	Nr.
Gebäudeeigentümer/-bewohner	Haushaltsnettoeinkommen	€/(Monat Person)	Metrisch	1
	Grenzsteuersatz	%	Metrisch	2
	Alter des Haushaltsvorstands	Jahre	Metrisch	3
	Bildungsgrad des Haushaltsvorstands	-	Ordinal	4
Gebäude	Investition*	€	Metrisch	5
	Notwendige Förderung	€	Metrisch	6
Umweltverbesserungspotenzial	CO ₂ -Vermeidung (direkte Emissionen inkl. Emissionen aus Biomasse)	t/(Haushalt a)	Metrisch	7

Clusterbildung: Die Anwendung der Clusteranalyse erfolgt in Kapitel 7.

Analyse und Interpretation¹⁷⁷: Die sich ergebenden Cluster werden als Zielgruppen interpretiert. Diese können anhand ihres Potenzials zur gesamten und durchschnittlichen CO₂-Vermeidung priorisiert werden. Anschließend werden ihnen Hemmnisse und dazu passende umweltpolitische Instrumente zugeordnet. Grundsätzlich müssen dabei selbstnutzende Eigentümer sowie Mieter (und damit Vermieter) unterschieden werden. Bei Selbstnutzern weisen hohe notwendige Förderungen sowie, kombiniert mit niedrigen Haushaltseinkommen, hohe Investitionen auf die etwaige Notwendigkeit entsprechender Förderprogramme hin. Kredite eignen sich eher für einkommensschwache Selbstnutzer und weniger für ältere Haushalte aufgrund deren kurzer Planungshorizonte. Zuschüsse sind demnach eher für ältere Selbstnutzer adäquat. Die Eignung der steuerlichen Abzugsfähigkeit bei Selbstnutzern ist in Relation zur Zuschuss- oder Kreditvariante zu sehen und hängt vom Vergleich des Grenzsteuersatzes der Haushalte mit der notwendigen anteiligen Förderung ab. Bei vermieteten Immobilien sind u. a. die Durchsetzbarkeit von Kalt-

¹⁷⁶ Vgl. Abschnitt 5.4.3.2 (Ö2a) bez. Gesamt- und Mehrinvestition.

¹⁷⁷ Vgl. Fußnote 159 bez. Stabilitäts- und Validitätsprüfungen.

mietensteigerungen, die Fähigkeit der Bewohner, Kaltmietensteigerungen infolge von Modernisierungen zu tragen, Planungshorizont und Informationsstand der Mieter sowie die Finanzierung der Investitionen durch die Eigentümer von Bedeutung. Die Ersteren können bspw. mit dem Alter, Haushaltsnettoeinkommen und Bildungsgrad der Bewohner sowie mit der Höhe der zu tätigen Investition zusammenhängen. Eine hohe zu tätige Investition kann zudem insbesondere bei privaten Vermietern auf die Notwendigkeit entsprechender Finanzierungsschemata bspw. über Kredite hinweisen. Die erwähnten umweltpolitischen Instrumente könnten durch angepasste suasorische Instrumente wie Informationskampagnen begleitet werden. Diese können ebenfalls auf Basis der Umweltverbesserungspotenziale priorisiert und an die anderen umweltpolitischen Instrumente und die Zielgruppeneigenschaften wie Alter und Bildungsgrad angepasst werden.

6.2.5 Identifizierung von „sozialen Brennpunkten“

In diesem Abschnitt wird ein Ansatz zur Analyse der Verteilung von mit der energetischen Modernisierung verbundenen finanziellen Belastungen entwickelt, der in unterschiedlichen *AWOHM*-Szenarien angewendet werden kann. Dadurch sollen drohende Überbelastungen von Haushalten mit niedrigem Einkommen und damit auch finanziell bedingte „soziale Brennpunkte“ frühzeitig erkannt werden. In der Folge können die Notwendigkeit von Gegenmaßnahmen a priori identifiziert und ggf. angepasste umweltpolitische Instrumente vorgeschlagen werden. Als Ergebnis werden interpretierbare Haushaltsgruppen angestrebt, die sich in ihren finanziellen Belastungen unterscheiden. Daher eignet sich wiederum die Clusteranalyse, deren Schritte im Folgenden erläutert werden (vgl. Backhaus u. a. 2003).

Problemstellung: Ziel der Anwendung der Clusteranalyse ist die Gruppierung von Gebäudebewohnern für unterschiedliche Szenarien, um die Verteilung der finanziellen Belastungen durch die energetische Modernisierung vor dem Hintergrund der finanziellen Stärke und der Lebensphase der Bewohner interpretieren zu können. Damit kann beurteilt werden, ob bestimmte Haushaltsgrup-

pen über- oder unterdurchschnittlich belastet werden. Als Folge können Veränderungen der Bündel umweltpolitischer Instrumente oder die Notwendigkeit von Transfer- oder Kompensationsleistungen abgeleitet werden. Um den grundsätzlichen Unterschieden Rechnung zu tragen, werden dabei separate Clusteranalysen für Selbstnutzer und Mieter durchgeführt.

Zu klassifizierende Objekte: Die zu klassifizierenden Objekte entsprechen allen Haushalten aus *AWOHM*. Diese tätigen im Falle der Selbstnutzer die Investition und werden im Falle von Mietern mit einer durch eine Modernisierungsumlage erhöhten Kaltmiete konfrontiert, die bei steigenden Energiepreisen verstärkt in den ersten Jahren nach der Modernisierung die Reduktion der warmen Nebenkosten übersteigen kann.

Variablenauswahl: Durch die Variablen sollen die Haushalte charakterisiert sowie deren finanzielle Belastung quantifiziert werden. Die bei Selbstnutzern und Mietern nur teilweise identische Variablenauswahl ist in Tabelle 97 dargestellt. Für die Charakterisierung der Haushalte werden in beiden Fällen die Haushaltsgröße und das Alter des Haushaltsvorstands herangezogen. Daraus lassen sich Rückschlüsse auf die Lebensphase des Haushalts ziehen. Bspw. weist ein hohes Alter auf Rentner hin und ein niedriges bis mittleres Alter bei einer Haushaltsgröße von mindestens drei Personen auf Familien mit Kindern. Zur Quantifizierung der finanziellen Belastung wird bei Mietern das Haushaltsnettoeinkommen¹⁷⁸ abzüglich Warmmiete vor der Sanierung, die Veränderung des Haushaltsnettoeinkommens abzüglich Warmmiete durch die Sanierung (bei Energiepreisen im Jahr der Sanierung) sowie der Modernisierungsanteil der Investition pro Kaltmiete vor der Sanierung herangezogen. Zur Quantifizierung der finanziellen Belastungen der Selbstnutzer wird einerseits über die Investition pro Haushaltsnettoeinkommen die Notwendigkeit der Finanzierung der Investition in die Betrachtung einbezogen. Andererseits wird die Gesamtbelastung durch die Veränderung des Haushaltsnettoeinkommens

¹⁷⁸ Das Haushaltsnettoeinkommen im Mikrozensus 2006 enthält u. a. Wohngeld sowie Transferleistungen für Unterkunft und Heizung (LDS NRW 2008).

abzüglich Energiekosten (bei Energiepreisen im Jahr der Sanierung) für Raumwärme und Warmwasser sowie abzüglich der Abnutzung der Investition berücksichtigt. Diese muss allerdings mit Bezug zum jeweiligen Haushaltsnettoeinkommen interpretiert werden. Die Variablen sind ausschließlich metrisch und werden mittels z-Transformation auf einen Mittelwert von 0 und eine Varianz von 1 standardisiert.

Tabelle 97: Variablen für die Identifizierung „sozialer Brennpunkte“ mittels einer Clusteranalyse; *: energiebedingte Mehrinvestition in die Gebäudehülle und Gesamtinvestition in das Wärmeversorgungspaket¹⁷⁹; **: bei Energiepreisen im Jahr der Sanierung

Bewohnertyp	Variablen	Einheit	Skalenniveau	Nr.
Mieter und Selbstnutzer	Haushaltsgröße	Personen	Metrisch	1
	Alter des Haushaltsvorstands	Jahre	Metrisch	2
Mieter	Modernisierungsanteil der Investition pro Kaltmiete vor Sanierung	€/(€/Monat)	Metrisch	3a
	Haushaltsnettoeinkommen abzüglich Warmmiete** vor der Sanierung	€/(Monat Person)	Metrisch	4a
	Veränderung des Haushaltsnettoeinkommens abzüglich Warmmiete**	€/(Monat Person)	Metrisch	5a
Selbstnutzer	Investition* pro monatlichem Haushaltsnettoeinkommen	€/(€/Monat Haushalt)	Metrisch	3b
	Haushaltsnettoeinkommen	€/(Monat Person)	Metrisch	4b
	Veränderung des Haushaltsnettoeinkommens abzüglich Energiekosten** für Raumwärme und Warmwasser sowie der Abnutzung der Investition*	€/(Monat Person)	Metrisch	5b

Proximitätsmaß: Siehe Abschnitt 6.2.2.

Fusionierungsalgorithmus: Siehe Abschnitt 6.2.2.

Clusteranzahl: Die Cluster werden sukzessive für eine Clusteranzahl von 1, 2, ..., N bestimmt. Basierend auf dem Heterogenitätsmaß wird dann die Clusteranzahl mit dem Ellbogenkriterium bestimmt (Backhaus u. a. 2003).

Clusterbildung: Die Anwendung der Clusteranalyse erfolgt in Kapitel 7.

Analyse und Interpretation¹⁸⁰: Bei der Analyse der Cluster können für unterschiedliche Szenarien ggf. kritische Kombinationen von Haushalten mit niedrigem Einkommen und hoher finanzieller Belastung identifiziert werden, die auf die Notwendigkeit von staatlichen Eingriffen bzw. Anpassungen des umweltpolitischen Instrumentenbündels hinweisen. Bei den Mietern kann der Ver-

¹⁷⁹ Vgl. Abschnitt 5.4.3.2 (Ö2a) bez. Gesamt- und Mehrinvestition.

¹⁸⁰ Vgl. Fußnote 159 bez. Stabilitäts- und Validitätsprüfungen.

gleich von Szenarien mit unterschiedlichen Modernisierungsumlagehöhen entsprechende Eingriffsmöglichkeiten aufdecken. Alternativ können Anpassungen beim Wohngeld (vgl. WoGG, 2013)¹⁸¹, Leistungen für Unterkunft und Heizung (vgl. SGB 2010) oder anderen Transferleistungen wie dem Heizkostenzuschuss als Gegenmaßnahme in Betracht gezogen werden. Bei den Selbstnutzern kann eine Anpassung der finanziellen Förderprogramme oder ein verstärktes *Wärmecontracting* als Lösungsansatz untersucht werden.

6.2.6 Identifizierung von Abhängigkeiten

In diesem Abschnitt wird das Vorgehen zur Identifizierung von Abhängigkeiten zwischen auf Mikroebene vorliegenden Daten des integrierten Wohngebäude- und Haushaltsmodells vorgestellt. Da die Treibhausgas- und Luftschadstoffemissionen¹⁸² und deren Reduktionen im Fokus der Hauptforschungsfrage liegen, wird das Vorgehen anhand dieses Anwendungsfalls erläutert. Durch die energetische Modernisierung der Gebäudehülle und eine damit verbundene Verminderung des Nutzenergiebedarfs können alle Emissionsarten um denselben Prozentsatz vermindert werden. Werden allerdings Wärmeerzeuger ausgetauscht, so können die prozentualen Emissionsreduktionen zwischen den Emissionsarten variieren und auch erhöhte Emissionen auftreten. Daher existieren Zielkonflikte zwischen den Emissionsarten, die auf aggregierter Ebene anhand der indikatorenbasierten Bewertung der Szenarien aufgedeckt werden. Die aggregierten Ergebnisse resultieren aus Entscheidungen der Gebäudeeigentümer über Maßnahmenpakete auf Mikroebene. Diese Entscheidungen wurden je nach Szenario bereits durch die Treibhausgas- und Luftschadstoffemissionen beeinflusst. Mit dem im Folgenden erläuterten Vorgehen sollen Treibhausgas- und Luftschadstoffemissionen sowie die entsprechenden Reduktionen auf Mikroebene näher analysiert und Abhängigkeiten identifiziert werden können. Die Betrachtung auf Mikroebene ermöglicht eine erweiterte

¹⁸¹ WoGG steht für Wohngeldgesetz.

¹⁸² Vgl. Fußnote 187 und Abschnitt 8.2 bez. indirekter Emissionen. Diese werden in *AWOHM* nicht berücksichtigt.

inhaltliche Interpretation der Emissionen, Emissionsreduktionen und Zielkonflikte. Darauf aufbauend kann bspw. weiterer technischer Forschungsbedarf abgeleitet werden.

Objekte und Variablen

Die Objekte, deren Daten bzw. Variablen auf Mikroebene vorliegen und auf Abhängigkeiten untersucht werden sollen, sind Gebäude (und alternativ Haushalte). Für den Anwendungsfall werden die in Tabelle 98 angegebenen Variablen ausgewählt. Diese beziehen sich auf Gebäude und umfassen Luftschadstoff- und Treibhausgasemissionen als wohnflächenspezifische Werte im Startjahr und im letzten Jahr der Simulation, die zugehörigen prozentualen Emissionsreduktionen sowie zur räumlichen Differenzierung Bundesland und Gemeindegrößenklasse. Es werden jeweils entweder die absoluten Emissionen oder die prozentuale Reduktion für die Analyse herangezogen. Die räumliche Differenzierung ist optional.

Tabelle 98: Variablen für die Identifizierung von Abhängigkeiten auf Gebäudeebene

Variablen		Einheit	Skalenniveau	Nr.
Räumliche Differenzierung	Bundesland	-	Nominal	1
	Gemeindegrößenklasse	-	Ordinal	2
Emissionen im Jahr 2006 und im Jahr 2030 bei unterschiedlichen Szenarien (vgl. Abschnitt 5.4.3)	CO ₂ -Emissionen (inkl. Biomasse)	kg/(m ² a)	Metrisch	3,4
	CO ₂ -Emissionen (exkl. Biomasse)	kg/(m ² a)	Metrisch	5,6
	CH ₄ -Emissionen	g/(m ² a)	Metrisch	7,8
	NO _x -Emissionen	g/(m ² a)	Metrisch	9,10
	SO ₂ -Emissionen	g/(m ² a)	Metrisch	11,12
	VOC-Emissionen	g/(m ² a)	Metrisch	13,14
	NMVOC-Emissionen	g/(m ² a)	Metrisch	15,16
	PM-Emissionen	g/(m ² a)	Metrisch	17,18
Emissionsreduktion von 2006 bis 2030 in unterschiedlichen Szenarien (vgl. Abschnitt 5.4.3)	CO ₂ -Emissionen (inkl. Biomasse)	%	Metrisch	19
	CO ₂ -Emissionen (exkl. Biomasse)	%	Metrisch	20
	CH ₄ -Emissionen	%	Metrisch	21
	NO _x -Emissionen	%	Metrisch	22
	SO ₂ -Emissionen	%	Metrisch	23
	VOC-Emissionen	%	Metrisch	24
	NMVOC-Emissionen	%	Metrisch	25
	PM-Emissionen	%	Metrisch	26

Vorgehen

Zur Identifizierung von Abhängigkeiten auf Mikroebene werden paarweise Korrelationen und Streudiagramme verwendet. Für jedes betrachtete Szenario werden Korrelationen zwischen den Emissionsreduktionen unterschiedlicher

Emissionsarten bis 2030 bestimmt. Sind die Emissionsminderungen zweier Emissionsarten in einem Szenario positiv korreliert, so ist bei den umgesetzten Maßnahmenpaketen zwischen den Emissionsarten kein grundsätzlicher Zielkonflikt identifizierbar. Bei negativer Korrelation sind die Maßnahmenpakete dieses Szenarios im Vergleich bei zunehmender Reduktion der einen Emissionsart mit einem Anstieg bzw. einer abnehmenden Reduktion der anderen Emissionsart verbunden. Die Korrelation erlaubt jedoch keine Aussage über Ursache und Wirkung und beschränkt sich auf die Identifizierung eines linearen Zusammenhangs zwischen zwei Variablen. Da jedoch bspw. bei unterschiedlichen Wärmeerzeugerpaketen und variierender Energieeffizienz mehrere lineare Zusammenhänge existieren können und neben der Reduktion auch die absoluten Werte vor der Sanierung bzw. im Jahr 2006 sowie nach der Sanierung bzw. im Jahr 2030 in unterschiedlichen Szenarien relevant sind, werden zusätzlich Streudiagramme eingesetzt. Diese werden ebenfalls paarweise für jeweils zwei Emissionsarten erstellt und beinhalten entweder Emissionsreduktionen für ein oder mehrere Szenarien oder Emissionen für unterschiedliche Zeitpunkte, d. h. 2006 und 2030, sowie ein oder mehrere Szenarien. Die Streudiagramme ermöglichen über die Zuordnung von Punktwolken oder linearen Zusammenhängen zu bestimmten Energieträgern, Wärmeerzeugertypen und Maßnahmenpaketen an der Gebäudehülle eine direkte Gegenüberstellung von Szenarien auf technischer Ebene. Dadurch kann ggf. auch technischer Forschungsbedarf in Abhängigkeit von den Szenarien abgeleitet werden.

7. Anwendung von *AWOHM*

Die Anwendung von *AWOHM* auf die Bundesrepublik Deutschland untergliedert sich in die Plausibilisierung der Startbestandserstellung in Abschnitt 7.1, die Simulation der Wohngebäude- und Haushaltsentwicklungspfade in den Abschnitten 7.2, 7.3 und 7.4 sowie die nachhaltigkeitsorientierte Bewertung dieser Pfade in Abschnitt 7.5. Die Simulation der Entwicklungspfade dient dabei der Bestimmung technischer Potenziale in Abschnitt 7.2, ökonomischer Potenziale in Abschnitt 7.3 und ausschöpfbarer Potenziale in Abschnitt 7.4. Dabei werden Bündel umweltpolitischer Instrumente identifiziert, die die Ausnutzung der Potenziale unterstützen können, und die Basis für die Beantwortung der Forschungsfragen in Kapitel 8 hergestellt.

Jeder Wohngebäude- und Haushaltsentwicklungspfad basiert auf einem Szenario, das mit Bezug zu Basisszenarien, deren Szenarioelemente (vgl. Abschnitt 5.6.1) in Tabelle 99 dargestellt sind, definiert wird. Bei der Definition der Szenarien in den jeweiligen Abschnitten werden nur diejenigen Szenarioelemente erwähnt, die jeweils im Vergleich zu den Basisszenarien variiert werden. Es existieren mehrere Basisszenarien, da zwar die Wahrscheinlichkeitsverteilungen für die Realisation von Zufallsvariablen vom Modellnutzer festgelegt werden, aber nicht die jeweiligen Realisationen. Diese ergeben sich erst im Laufe der Simulation.

Tabelle 99: Übersicht über die *AWOHM*-Szenarioelemente der Basisszenarien, auf die bei der Definition aller sonstigen Szenarien Bezug genommen wird (Datengrundlage: Annahmen)

Szenarioelemente		Basisszenarien		
		Wert bzw. Erläuterung	Vgl. Abschnitt	
Umweltpolitische Instrumente	Mindestanforderungen	H++++W**	5.6.3	
	Investitionszuschüsse	\$	5.6.3	
	Steuerliche Absetzbarkeit	Nein	5.6.3	
	Energiesteuern	#	5.6.3	
	Informationskampagnen	Nein	5.6.3	
Entscheidungsansätze	Rein selbstnutzender Eigentümer	Ökonom	5.4	
	Selbstnutzende Eigentümergemeinschaft	Ökonom	5.4	
	Amateurvermieter mit teils selbstg. Gebäude	Substanzerhaltungsstr. Erweitert	5.4	
	Amateurvermieter mit vollst. verm. Gebäude	Substanzerhaltungsstr. Erweitert	5.4	
	Professioneller/institutioneller Vermieter	Substanzerhaltungsstr. Erweitert	5.4	
Aktivierte Module	Gebäudedynamik	Sanierung	Aktiv	5.4
		Neubau	Aktiv	5.4.6
		Abbruch	Aktiv	5.4.5
	Haushaltdynamik	Haushaltsveränderung im engeren Sinne	Aktiv	5.5.1
		Wohnungsmarktwechsel	Aktiv	5.5.2
		Wohnungssuche	Aktiv	5.5.3
Realisationen von Zufallsvariablen	Gebäudebestand	Baujahr	Durch Zufallsziehung bestimmt	5.3
		Gebäudetyp	Durch Zufallsziehung bestimmt	5.3
		Gebäudehülle	Durch Zufallsziehung bestimmt	5.3
		Wärmeversorgungspaket	Durch Zufallsziehung bestimmt	5.3
		Eigentümerstruktur	Durch Zufallsziehung bestimmt	5.3
	Haushaltdynamik	Tod	Durch Zufallsziehung bestimmt	5.5.1
		Geburt	Durch Zufallsziehung bestimmt	5.5.1
		Kinderauszug	Durch Zufallsziehung bestimmt	5.5.1
		Zusammenlegen/Teilen	Durch Zufallsziehung bestimmt	5.5.1
		Wohnungsmarktwechsel	Durch Zufallsziehung bestimmt	5.5.2
Sonstige unsichere Parameter	Primärenergiefaktoren		Gemäß Tabelle 29	5.3.9
	Emissionsfaktoren		Gemäß Tabelle 27	5.3.9
	Energieträgerpreise		Gemäß Tabelle 29	5.3.9
	Jährliche Energieteuerungsrate [1/a]		0,03 (vgl. Tabelle 49)	5.4.3
	Auf die Mieter umgelegter Anteil der Modernisierung [-]		0,11 (vgl. Tabelle 49)	5.4.3
	Anzahl der Energieberater pro Wohngebäude mit 1-2 Wohneinheiten [-]		0,0001 (vgl. Tabelle 49)	5.4.3
	Garantiejahre [a]		2 (vgl. Tabelle 49)	5.4.3
	Energiepreisanstiegserwartung [1 (steigend), 0 (konstant)]		0 (vgl. Tabelle 49)	5.4.3
	Renteneintrittsalter [a]		65	5.5.1
	Anteil des verbleibenden Einkommens bei Renteneintritt [-]		0,5	5.5.1
	Jährlicher Nettoeinkommensanstieg [1/a]		0,01	5.5.1
	Lebensdauer von	Hüllenpaketen [a]	40 (vgl. Tabelle 49)	5.4.3
		Wärmeerzeugern [a]	20 (vgl. Tabelle 49)	5.4.3
	Planungshorizont für Energieträgerwechselinvestitionen [a]		40 (vgl. Tabelle 49)	5.4.3
	Planungshorizont für Verrohrungs- und Speicherinvestitionen [a]		40 (vgl. Tabelle 49)	5.4.3
	Kalkulationszinssatz [1/a]		0,05 (vgl. Tabelle 49)	5.4.3
	Gradstunden, Heizzeit und Globalstrahlung mit	Raumsolltemperatur [°C]	17	5.4
		Heizgrenztemperatur [°C]	15	5.4
	Außentemperaturen		Gemäß Loga (2012)	5.4
		Solarstrahlung	Gemäß Loga (2012)	5.4
Sonstige Parameter		Nicht variiert	5 (Kapitel)	

7.1 Plausibilisierung der Startbestandserstellung

In diesem Abschnitt wird die *AWOHM*-Startbestandserstellung (vgl. Abschnitt 5.3) im Rahmen mehrerer Unsicherheitsanalysen (vgl. Abschnitt 5.6.2) plausibilisiert. Die Plausibilisierung der Bestandsveränderung erfolgt begleitend zur Ergebnisableitung und -diskussion in den folgenden Abschnitten. Die Unsicherheitsanalysen können charakterisiert werden anhand

- der Analyseart,
- der analysierten Parameter und
- der räumlichen Auflösung.

Das folgende Vorgehen ist gemäß den analysierten Parametern strukturiert. Diese umfassen strukturelle Parameter und Indikatoren, die auch zur Bewertung aus Staatssicht herangezogen werden. Als Analysearten kommen (1) der Vergleich von Modellparametern mit exogenen Daten, (2) der Vergleich von Modellparametern mehrerer, im Rahmen einer *Monte-Carlo*-Simulation automatisch generierter Szenarien, (3) der Vergleich von Modellparametern mehrerer, manuell definierter Szenarien sowie entsprechende Kombinationen zum Einsatz (vgl. Abschnitt 5.6.2). Beim Vergleich mit exogenen Daten ist die Verfügbarkeit entsprechender Daten maßgebend für die Auswahl der zu analysierenden Parameter und deren räumliche Auflösung. Als strukturelle Parameter werden dabei (1) die Wohnfläche und die Wohneinheitenanzahl, (2) die Wärmeerzeugeranzahl sowie (3) die energetische Qualität der Gebäudehüllkomponenten herangezogen. Als Indikatoren werden aus Abschnitt 6.1 diejenigen mit Bestandsbezug (im Gegensatz zum Bestandsveränderungsbezug) herangezogen. Diese umfassen vor allem den (1) Energieverbrauch, (2) die Luftschadstoff- und Treibhausgasemissionen sowie (3) das verfügbare Einkommen nach Energiekosten bzw. Wohnen¹⁸³. Darüber hinaus werden wegen

¹⁸³ Bei Selbstnutzern wurde das Haushaltsnettoeinkommen abzüglich Energiekosten für Raumwärme und Warmwasser angesetzt. Im Falle der Mieter wurde zudem die Kaltmiete abgezogen.

entsprechender Datenverfügbarkeit im SUF des Mikrozensus 2006 bei Mietern (4) die warmen Nebenkosten auf Wohnungsebene herangezogen. Die Unsicherheitsanalysen umfassen als räumliche Ebenen je nach Datenverfügbarkeit und Schwerpunkt der Forschungsfragen (vgl. Kapitel 1) die räumlichen Auflösungen (1) Deutschland bzw. nationale Ebene, (2) Kreise, (3) Gemeinden und (4) Gebäude- bzw. Haushaltsebene.¹⁸⁴

Tabelle 100 fasst differenziert nach zu analysierenden Parametern zusammen, welche Szenarien für die Unsicherheitsanalyse des Startbestands im Jahr 2006 herangezogen werden. Vorwiegend sollen die Parameter der Basisszenarien als Grundlage für die Modellierung der Bestandsentwicklung plausibilisiert werden. Für die Analyseart (1), d. h. den Vergleich von Modellparametern mit exogenen Daten, werden daher primär die Basisszenarien betrachtet. Sich ergebende Abweichungen können als Gesamtunsicherheit interpretiert werden. In der Analyseart (2), d. h. dem Vergleich von Modellparametern mehrerer, im Rahmen einer *Monte-Carlo*-Simulation automatisch generierter Szenarien, werden mehrere Simulationsläufe betrachtet, um die durch die Zufallsziehungen eingebrachte Unsicherheit im Vergleich zur Gesamtunsicherheit interpretieren zu können. Anhand der Analyseart (3), d. h. des Vergleichs von Modellparametern mehrerer, manuell definierter Szenarien, werden für jeden zu analysierenden Parameter bis zu drei von den Basisszenarien abweichende Szenarien betrachtet. Dabei werden gezielt Szenarioelemente variiert, auf die die zu analysierenden Parameter sensitiv reagieren („Modelliererwissen“). Diese Abweichungen können denen der Analysearten (1) und (2) vergleichend gegenübergestellt werden.

¹⁸⁴ Wird bspw. die Häufigkeitsverteilung des haushaltsspezifischen Energieverbrauchs in Deutschland betrachtet, so wird diese der räumlichen Auflösung Deutschland zugeordnet.

Tabelle 100: Szenarien für die Unsicherheitsanalyse des Startbestands im Jahr 2006 differenziert nach zu analysierenden Parametern (Datengrundlage: Annahmen); X (Simulationsanzahl): Parameter wird für dieses Szenario analysiert

Zu analysierende Parameter		Szenarien für die Unsicherheitsanalyse				
		Basis	I	II	III	IV
		-	Lebensdauer Hüllpaket: 30 a; Wärmeerzeuger: 15 a	Lebensdauer Hüllpaket: 50 a; Wärmeerzeuger: 25 a	Raumsolltemperatur 18°C (statt 17°C)	Veränderte Wärmeversorgungspaketverteilung durch: 4 (statt 1) WE (Wohneinheiten) pro Etage; 1 (statt 3) dezentraler Raumwärmerezeuger pro WE; 1 (statt 2) dezentraler Warmwasserezeuger pro WE
Strukturelle Daten	Wohnflächen und Wohneinheitenanzahl	X (1)	-	-	-	-
	Wärmeerzeugeranzahl	X (1)	X	X	-	X
	Energetische Qualität der Bauteile	X (1)	X	X	-	-
Indikatoren	Endenergiebedarf	X (20)	X	X	X	-
	Luftschadstoff- und Treibhausgasemissionen	X (20)	X	X	X	-
	Verfügb. Einkommen nach Wohnen	X (20)	X	X	X	-
	Warme Nebenkosten	X (20)	-	-	X	-
	Sonstiges	X (20)	X	X	X	-

7.1.1 Wohnflächen und Wohneinheitenanzahl

Nach Tabelle 101 weisen Wohnfläche und Wohneinheitenanzahl in Wohngebäuden für das Jahr 2006 in *AWOHM* auf nationaler Ebene Abweichungen von weniger als 1% im Vergleich zu Angaben vom Statistischen Bundesamt (2008a) auf. Angaben des IWU (2007), bei denen nicht klar spezifiziert war, ob diese sich auf alle oder nur bewohnte Wohneinheiten beziehen, liegen innerhalb des Schwankungsbereichs von bewohnter bis gesamter Wohnfläche bzw. Wohneinheitenanzahl.

Tabelle 101: Vergleich von Wohnfläche und Wohneinheitenanzahl in Wohngebäuden für das Jahr 2006 bzw. 2007

Kennwert	Datenherkunft	Gesamt	Bewohnt	Jahr
Wohnfläche [Mrd. m ²]	<i>AWOHM</i> -Basisszenario	3,54	3,26	2006
	IWU (2007)	3,35 (Zuordnung unklar)		2007
	Statistisches Bundesamt (2008a)	-	3,29	2006
Wohneinheitenanzahl [Mio. Wohneinheiten]	<i>AWOHM</i> -Basisszenario	39,4	36,2	2006
	IWU (2007)	39,0 (Zuordnung unklar)		2007
	Statistisches Bundesamt (2008a)	39,3	36,2	2006

Im Vergleich zu Angaben des IWU (2007) (Annahme: inkl. Leerstand) weichen in *AWOHM* die Wohnflächen der Gebäudetypen EFH, RH, MFH, GMH und HH jeweils um 0% bis 14% ab, die Wohneinheitenanzahl dahingegen um -6% bis 22%. Aufgrund unterschiedlicher Baualtersverteilungen in den Datenquellen

sind die Abweichungen bei Differenzierung nach Gebäudetyp und Baualtersklasse mit durchschnittlich 8% bzw. 0% und maximal 41% bzw. -44% größer (vgl. Anhang A.2, Tabelle 135). Auch bei Sonderbauten sind größere Abweichungen zu beobachten (vgl. Anhang A.2, Tabelle 136).

Gemäß Tabelle 102 liegt die maximale Abweichung der Wohneinheitenanzahl im Vergleich zur amtlichen Gemeindestatistik (Statistisches Bundesamt 2008b) differenziert nach Bundesländern bei -1,6% (Bayern). Bei zusätzlicher Differenzierung nach der Anzahl an Wohneinheiten im Gebäude steigt diese auf 10,9% (Gebäude mit einer Wohneinheit, Sachsen-Anhalt).

Tabelle 102: Abweichung der *AWOHM*-Wohneinheitenanzahl (inkl. Leerstand) in einem Basisszenario von Daten der amtlichen Gemeindestatistik differenziert nach Bundesländern im Jahr 2006 (eigene Berechnung; Datengrundlage für Vergleichswerte: Statistisches Bundesamt 2008b)

Bundesland	Abweichung der <i>AWOHM</i> -Wohneinheitenanzahl (inkl. Leerstand) in Gebäuden mit			
	1 Wohneinheit	2 Wohneinheiten	mindestens 3 Wohneinheiten	beliebiger Wohneinheitenanzahl
Baden-Württemberg	0,8%	-0,2%	-2,9%	-1,3%
Bayern	-1,5%	-0,3%	-2,3%	-1,6%
Berlin	1,1%	5,5%	-0,1%	0,1%
Brandenburg	4,4%	4,2%	-4,1%	-0,1%
Bremen	1,7%	-0,8%	-0,8%	-0,2%
Hamburg	-0,2%	2,7%	-0,9%	-0,6%
Hessen	0,2%	-0,4%	-2,2%	-1,2%
Mecklenburg-Vorpommern	3,4%	4,0%	-3,5%	-0,7%
Niedersachsen	0,8%	-1,0%	-3,9%	-1,5%
Nordrhein-Westfalen	2,2%	0,0%	-2,2%	-0,7%
Rheinland-Pfalz	-0,6%	0,7%	-3,0%	-1,2%
Saarland	1,3%	-0,1%	-4,1%	-0,8%
Sachsen	5,3%	7,2%	-3,7%	-0,6%
Sachsen-Anhalt	10,9%	9,7%	-7,6%	-0,1%
Schleswig-Holstein	1,1%	-4,3%	-2,9%	-1,5%
Thüringen	3,3%	6,8%	-4,7%	-0,3%
Deutschland	1,3%	0,7%	-2,7%	-1,0%

7.1.2 Wärmeerzeugeranzahl

Gemäß Tabelle 103 liegt die Anzahl der Gas- und Ölfeuerungen in *AWOHM* um 41% bzw. 36% über den von Struschka u. a. (2008) angegebenen Werte. Insbesondere auch da Struschka u. a. (2008) auf Daten aus älteren Forschungsarbeiten (vgl. Pfeiffer u. a. 2000; Struschka u. a. 2003) und von persönlichen Auskünften von Unternehmensmitarbeitern zurückgreifen sowie eigene Schätzungen und Berechnungen durchführen, kann keine Aussage darüber getroffen

werden, welche Wärmeerzeugeranahl verlässlicher ist. Gas- und Ölbrennwertgeräte werden um 143% bzw. 171% überschätzt, was trotz der gerade bei Ölfuerungen noch relativ geringen Anteile tendenziell zu einer leichten Unterschätzung von Energieeinsparpotenzialen führen kann.

Da in *AWOHM* keine Nebenfeuerstätten berücksichtigt werden, werden Wärmeerzeuger vom Typ *Holz - Sonstige* im Vergleich zu den Zahlen von Struschka u. a. (2008) nur zu 15% abgedeckt. Auch Steinkohlebriketts, Steinkohle und Steinkohlekoks nutzende Wärmeerzeuger werden nur zu 15% abgedeckt. Dies kann ggf. dadurch erklärt werden, dass dem Bereich der privaten Haushalte, auf die sich die Daten von Struschka u. a. (2008) beziehen, nicht nur Wohngebäude zugeordnet werden.

Tabelle 103: Vergleich der *AWOHM*-Wärmeerzeugeranahl in einem Basisszenario [bzw. Szenario I, II, IV] mit von Struschka u. a. (2008) veröffentlichten Daten differenziert nach Energieträger bzw. aggregiertem Wärmeerzeugertyp

Energieträger bzw. aggregierter Wärmeerzeugertyp	Wärmeerzeugeranahl im Jahr [Tsd. Wärmeerzeuger]		Abweichung der <i>AWOHM</i> -Werte im Basisszenario im Vergleich zu Struschka u. a. (2008)			
	2006 gemäß Modell	2005 gemäß Struschka u. a. (2008)	Relativ [Szenario I, II, IV]		Absolut [Tsd. Wärmeerzeuger]	
Braunkohlebriketts	1.254	720	74% [74%; 74%; -30%]	74%	533	533
Gas - Brennwertgeräte	2.532	1.044	143% [196%; 105%; 101%]		1.488	
Gas - Gasbrenner mit/ohne Gebläse	10.397	7.082	47% [38%; 53%; 21%]	41% [40%;	3.315	
Gas - Sonstige	6.349	5.520	15% [13%; 18%; -9%]	43%; 15%]	829	5.633
Holz - Pelletöfen und Heizkessel für Pellets	78	74	5% [30%; -10%; -2%]	9% [10%;	4	
Holz - Heizkessel handbeschickt	515	468	10% [6%; 12%; 6%]	9%; 5%]	47	51
Holz - Sonstige	1.442	9.792	-85% [-85%; -85%; -94%]	-85%	-8.350	-8.350
Öl - Brennwertgeräte	184	68	171% [226%; 116%; 135%]		116	
Öl - Heizkessel mit Ölgebläsebrenner	7.497	5.669	32% [29%; 33%; 17%]	36% [36%;	1.828	
Öl - Ölofen mit Verdampfungsbrenner	1.713	1.162	47% [59%; 46%; 36%]	26%; 22%]	550	2.494
Steinkohlebriketts, Steinkohle und Steinkohlekoks	233	1.590	-85% [-85%; -85%; -93%]	-85%	-1.356	-1.356
Strom - Dezentrale Warmwasserbereitung	26.254	-	-	-	-	-
Strom - Dezentrale Raumwärme	6.440	-	-	-	-	-
Strom - Zentrale Raumwärme	364	-	-	-	-	-
Solarthermie	658	-	-	-	-	-
Fernwärme	1.783	-	-	-	-	-

Die Abweichung der Wärmeerzeugeranahl in den Szenarien I, II und IV vom Basisszenario wird in Tabelle 103 differenziert nach (aggregierten) Wärmeerzeugertypen dargestellt. In Szenario IV sinkt bspw. die Überschätzung der Anzahl der Gas- und Ölfuerungen im Vergleich zu Struschka u. a. (2008) auf 15%

bzw. 22%. Bei den Szenarien I und II ändert sich dahingegen überwiegend die Verteilung der Wärmeerzeuger innerhalb der Energieträgerklassen.

7.1.3 Energetische Qualität der Bauteile

Der mit *AWOHM* bestimmte Anteil der Wohneinheiten im Jahr 2006 mit nachträglicher energetischer Verbesserung der Gebäudehülle wird in Tabelle 104 von Diefenbach u. a. (2010) veröffentlichten Daten (Anteil der Gebäude), die sich auf das Jahr 2009/2010 beziehen, gegenübergestellt. Dabei werden sowohl Bauteile als auch (aggregierte) Gebäudetypen und Baualtersklassen unterschieden. Die *AWOHM*-Modellwerte (für „alle“ Gebäude) unterschreiten die Vergleichswerte um 3-6% (Anteil der Wohneinheiten bzw. Gebäude) für obere Gebäudeabschlüsse, 2-8% für Wände und 1-3% für untere Gebäudeabschlüsse. Bei jährlichen energetischen Modernisierungsraten in der Periode 2005-2008 von 1,5% für obere Gebäudeabschlüsse, 0,8% für Wände und 0,3% für untere Gebäudeabschlüsse (Diefenbach u. a. 2010) kann diese Abweichung durch unterschiedliche Bezugsjahre erklärt werden.

Tabelle 104: Anteil der Wohneinheiten im Jahr 2006 mit nachträglicher energetischer Verbesserung der Gebäudehülle gemäß *AWOHM* im Basisszenario [bzw. Szenario II, I] im Vergleich zu von Diefenbach u. a. (2010) veröffentlichten Daten (Anteil der Gebäude) zum Jahr 2009/2010 differenziert nach Gebäudetypen und Baualtersklassen

Gebäude- typ	Bau- alters- klasse	Datenherkunft	Fenster	Oberer Ge- bäude- abschluss	Wand	Unterer Ge- bäude- abschluss
Alle	Alle	<i>AWOHM</i> – 2006 – Basisszenario [Szenario II, I]	44% [30-55%]	33% [23-42%]	14% [10-18%]	6% [5-8%]
		Diefenbach u. a. – 2009/2010	-	37%	16%	8%
		Differenz	-	4%	2%	2%
EFH, RH	Alle	<i>AWOHM</i> – 2006 – Basisszenario [Szenario II, I]	40% [28-51%]	31% [22-40%]	13% [9-16%]	6% [4-8%]
		Diefenbach u. a. – 2009/2010	-	36%	15%	7%
		Differenz	-	5%	2%	1%
	-1978	<i>AWOHM</i> – 2006 – Basisszenario [Szenario II, I]	57% [40-72%]	44% [31-56%]	18% [13-23%]	9% [6-11%]
		Diefenbach u. a. – 2009/2010	-	47%	20%	10%
		Differenz	-	3%	2%	1%
MFH, GMH, HH und Son- derbauten	Alle	<i>AWOHM</i> – 2006 – Basisszenario [Szenario II, I]	47% [32-58%]	35% [24-44%]	15% [11-19%]	7% [5-9%]
		Diefenbach u. a. – 2009/2010	-	41%	23%	10%
		Differenz	-	6%	8%	3%
	-1978	<i>AWOHM</i> – 2006 – Basisszenario [Szenario II, I]	57% [37-73%]	44% [29-56%]	18% [12-24%]	8% [6-11%]
		Diefenbach u. a. – 2009/2010	-	48%	26%	11%
		Differenz	-	4%	8%	3%

Der mit *AWOHM* bestimmte Anteil der Fensterbaualtersklassen im Jahr 2006 gemäß Wohneinheitenanzahl im Vergleich zu von Diefenbach u. a. (2010) veröffentlichten Daten (Anteil der Gebäude) zum Jahr 2009/2010 ist in Tabelle 105 dargestellt. Die *AWOHM*-Modellwerte (für „alle“ Gebäude) überschreiten die Vergleichswerte für die Fensterbaualtersklasse bis 1984 um 18-22% (Anteil der Wohneinheiten bzw. Gebäude) und unterschreiten sie für die übrigen Baualtersklassen um 1-7%. Bei einer jährlichen Fenstermodernisierungsrate für den Bestand von 1,8% in der Periode 2005-2009 (Diefenbach u. a. 2010) kann nur die Abweichung der Baualtersklasse ab 2005 und ein Teil der Abweichung der Baualtersklasse bis 1984 durch diese erklärt werden. Für die übrigen Baualtersklassen wurde eine im Vergleich zu niedrige Sanierungsrate für Fenster angesetzt. Insgesamt wird die bisherige Sanierungsaktivität bei den Fenstern im Gegensatz zu den Sanierungsaktivitäten an den anderen Gebäudehüllenelementen also unterschätzt.

Tabelle 105: Anteil der Fensterbaualtersklassen im Jahr 2006 an allen Wohneinheiten gemäß *AWOHM* im Basisszenario [bzw. Szenario II, I] im Vergleich zu von Diefenbach u. a. (2010) veröffentlichten Daten (Anteil der Gebäude) zum Jahr 2009/2010

Baualters- klasse	Datenherkunft	Fensterbaualtersklasse					
		-1984	1985-1989	1990-1994	1995-1999	2000-2004	Ab 2005
Alle	<i>AWOHM</i> - 2006 - Basis- szenario [Sz. II, I]	46% [60-38%]	8% [8-13%]	12% [7-14%]	15% [10-16%]	14% [12-14%]	4% [4-4%]
	Diefenbach u. a. - 2009/2010	28%	12%	16%	19%	16%	9%
	Differenz	18%	-4%	-4%	-4%	-2%	-5%
-1978	<i>AWOHM</i> - 2006 - Basis- szenario [Sz. II, I]	55% [73-44%]	5% [4-12%]	11% [4-13%]	12% [5-14%]	12% [10-13%]	5% [4-5%]
	Diefenbach u. a. - 2009/2010	33%	12%	16%	18%	13%	8%
	Differenz	22%	-7%	-5%	-6%	-1%	-3%

Der mit *AWOHM* bestimmte Anteil der Wohneinheiten im Jahr 2006 mit nachträglicher energetischer Verbesserung der Gebäudehülle ist differenziert nach Gebäudetyp und Bauteil in Tabelle 106 angegeben und nicht bauteilspezifischen Vergleichswerten gegenübergestellt. Bei allen Gebäudetypen liegen die Vergleichswerte zwischen den *AWOHM*-Anteilen für die nachträgliche Dämmung von oberem Gebäudeabschluss und Außenwand.

Tabelle 106: Anteil der Wohneinheiten im Jahr 2006 mit nachträglicher energetischer Verbesserung der Gebäudehülle gemäß *AWOHM* im Basisszenario differenziert nach Gebäudetyp und Bauteil

Gebäudetyp	Fenster	Ob. Gebäudeabschluss	Wand	Unt. Gebäudeabschluss	Vergleichswert	
EFH	31%	25%	10%	5%	20%	„Wärmeschutz nach Altbauforderungen der EnEV für die gesamte Gebäudehülle“ (Diefenbach & Enseling 2007)
RH	42%	32%	13%	6%		
MFH	41%	32%	13%	6%		
GMH	52%	42%	17%	8%		
HH	27%	21%	10%	5%		
MFH_NBL	72%	46%	24%	9%	40%	Energetisch sanierte Sonderbauten in den neuen Bundesländern (Kretschmer 2006)
GMH_NBL	73%	45%	24%	8%		
HH_NBL	67%	42%	24%	8%		

7.1.4 End- und Primärenergieverbrauch

Gemäß Tabelle 107 werden auf nationaler Ebene der End- und der Primärenergieverbrauch in *AWOHM* im Vergleich zu exogenen Referenzwerten um 2% überschätzt. Ein Vergleich des Endenergieverbrauchs je Energieträger zeigt, dass Gas- und Ölverbrauch um 5% bzw. 7% überschätzt werden, wobei der Verbrauch an Holz u. a. erneuerbaren Energien sowie Steinkohle und Braunkohle unterschätzt wird. Da die *SUF*-Daten und damit der *AWOHM*-Startbestand nur die Hauptfeuerstätten und deren Energieträgerverbrauch berücksichtigen, ist dies plausibel. Nebenfeuerstätten wie Kamine und Kaminöfen werden vernachlässigt. Entsprechend wird der Verbrauch von Holz (u. a. erneuerbaren Energien), das häufig in Nebenfeuerstätten verwendet wird, mit -47% Abweichung zum Referenzwert stark unterschätzt.

Im Gegensatz zu diesen strukturellen, systemgrenzenbedingten Abweichungen ist die durch nicht-deterministische Berechnungsvorschriften induzierte Unsicherheit, die basierend auf den Ergebnissen mehrerer Basisszenarien durch die maximale Abweichung vom Mittelwert quantifiziert wird, mit höchstens 2% gering. Diese kann den Zufallsziehungen der Anlagentechnik, Gebäudetypen und Energieeffizienzeigenschaften der Gebäudehülle, für die ausschließlich die Häufigkeitsverteilung bekannt war (vgl. Abschnitt 5.3), zugeschrieben werden.

Die manuell definierten Szenarien I, II und III zeigen, dass die Variation der Lebensdauern bei der Erstellung des Startbestands durch die Verschiebung

der Sanierungszeitpunkte in der Vergangenheit Abweichungen im Vergleich zum Basisszenario von maximal 6% zur Folge hat, wohingegen eine Erhöhung der Raumsolltemperatur um 1°C mit ca. 10% einen größeren Einfluss hat. Die durch manuelle Parametervariationen bedingten Abweichungen sind einerseits größer als die zufallsziehungsbedingten. Andererseits liegen sie in den meisten Fällen in derselben Größenordnung wie die Abweichungen von den Referenzwerten, sodass für einzelne Indikatoren entsprechende Nachjustierungen möglich wären. Diese führten allerdings wieder zu verstärkten Abweichungen bei anderen Indikatoren.

Tabelle 107: Vergleich von Endenergiebedarfsindikatoren auf nationaler Ebene für das Jahr 2006 für mehrere Szenarien gemäß *AWOHM* und mit exogenen Referenzwerten (eigene Berechnung; Datengrundlage für Referenzwerte: DIN EN 15603 2008; Statistisches Bundesamt 2008a; Arbeitsgemeinschaft Energiebilanzen e.V. 2012)

Indikator auf Ebene 4		Einheit	Mittelwert über Basis-szenarien	Referenzwert	Abweichung des Mittelwerts vom Referenzwert	Max. Abweichung vom Mittelwert in den Basisszen.	Abweichung vom Mittelwert in Szenario		
							I	II	III
D ₁₁₁₇	Wohnflächenspezifischer Endenergiebedarf	kWh/(m ² a)	177,01	173,68	2%	0%	-3%	4%	10%
D ₁₁₂₁	Gesamtprimärenergiebedarf (inkl. erneuerbare Energien)	EJ/a	3,12	3,10	1%	0%	-3%	4%	9%
D ₁₁₃₁	Endenergiebedarf Gas	EJ/a	1,04	0,99	5%	0%	-3%	4%	10%
D ₁₁₃₂	Endenergiebedarf Öl	EJ/a	0,78	0,73	7%	0%	-3%	4%	10%
D ₁₁₃₃	Endenergiebedarf Strom	EJ/a	0,12	0,12	-6%	0%	-3%	3%	7%
D ₁₁₃₄	Endenergiebedarf Braunkohle	EJ/a	0,02	0,02	-1%	1%	-4%	3%	10%
D ₁₁₃₅	Endenergiebedarf Steinkohle	EJ/a	0,01	0,02	-67%	2%	-3%	4%	10%
D ₁₁₃₆	Endenergiebedarf Fernwärme	EJ/a	0,19	0,15	23%	0%	-2%	6%	10%
D ₁₃₁₁	Endenergiebedarf Holz u. a. erneuerbare Energien	EJ/a	0,11	0,21	-47%	0%	-3%	3%	10%
D ₁₃₁₂	Anteil Holz u. a. erneuerbare Energien am Endenergiebedarf	kWh/kWh	0,05	0,09	-48%	0%	0%	-1%	0%

Auf Wohnungsebene reicht der Endenergieverbrauch gemäß Abbildung 25 von ca. 60 bis zu über 350 kWh/(m² a). Der nicht erneuerbare bzw. gesamte Primärenergieverbrauch reicht von ca. 0 bzw. 40 bis über 500 kWh/(m² a) und weist damit eine größere Spannweite auf. Diese ist bedingt durch Unterschiede im Anteil erneuerbarer Energien und in der Effizienz der Energieversorgungsketten. Die rechten Enden der Primärenergieverbrauchsverteilungen

können bspw. auf die Verwendung von Elektrizität als Energieträger hinweisen. Der große Anteil an Wohnungen mit einem überdurchschnittlichen Endenergieverbrauch, d. h. größer als $177 \text{ kWh}/(\text{m}^2 \text{ a})$, verdeutlicht die Notwendigkeit und die Potenziale energetischer Modernisierungen im Wohngebäudebestand. Die durch nicht-deterministische Berechnungsvorschriften induzierte Unsicherheit der Verteilungskurven, operationalisiert durch die relative Abweichung der Wohnungsanzahl bei vorgegebenem Energieverbrauch (vgl. „Obergrenzen“ und „Untergrenzen“ in Abbildung 25), ist deutlich niedriger als die Schwankungsbreite des Energieverbrauchs (d. h. der relativen Abweichung vom Mittelwert) im Gebäudebestand.

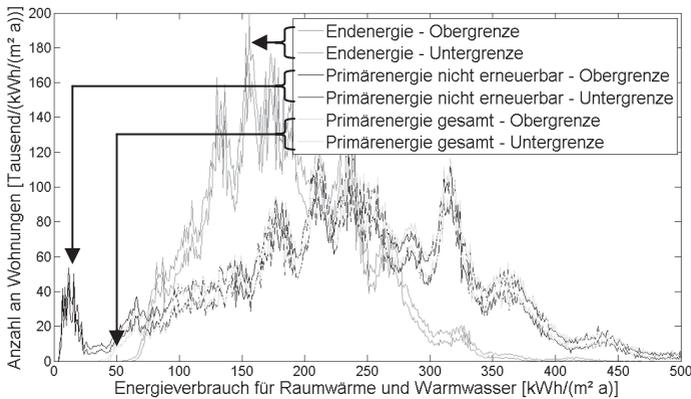


Abbildung 25: Unter- und Obergrenzen der Häufigkeiten von Wohneinheiten in Abhängigkeit vom Energieverbrauch für Raumwärme und Warmwasser im Jahr 2006 differenziert nach Endenergie sowie nicht erneuerbarer und gesamter Primärenergie bei der Simulation von 20 Basisszenarien

7.1.5 Luftschadstoff- und Treibhausgasemissionen

Als Folge der durch die Nichtberücksichtigung von Nebenfeuerstätten induzierten Unterschätzung des Verbrauchs von Holz u. a. erneuerbaren Energieträgern (vgl. Abschnitt 7.1.4) werden im Vergleich zu exogenen Referenzwer-

ten gemäß Tabelle 108 die CO₂-Emissionen exkl. bzw. inkl. Biomasse¹⁸⁵ auf nationaler Ebene geringfügig über- bzw. unterschätzt. Während die Emissionen an SO₂ und NO_x um 4% unterschätzt werden, treten bei Emissionen an CH₄, VOC, NMVOC und PM größere Unterschätzungen auf, was durch hohe Emissionsfaktoren von häufig als Nebenfeuerstätten eingesetzten Festbrennstofffeuerungen erklärbar ist. Bei der Beurteilung dieser Unsicherheiten sollte berücksichtigt werden, dass die Unsicherheiten der verwendeten Emissionsfaktoren in einigen Fällen auch relativ hoch sind, bspw. über 60% bei NMVOC, 20-90% bei SO₂, 20-70% bei NO_x und VOC sowie mehr als 20% bei CH₄ und PM (Struschka u. a. 2008). Die durch nicht-deterministische Berechnungsvorschriften induzierten Abweichungen vom Mittelwert sind im Vergleich zur Gesamtunsicherheit mit maximal 2% gering. Die manuell definierten Szenarien I, II und III zeigen analog zum Energieverbrauch Abweichungen von maximal 10% und sind damit größer als die zufallsziehungsbedingte Unsicherheit sowie je nach Indikator kleiner oder größer als die Gesamtunsicherheit.

Tabelle 108: Vergleich von Luftschadstoff- und Treibhausgasemissionsindikatoren auf nationaler Ebene für das Jahr 2006 für mehrere Szenarien gemäß *AWOHM* und mit exogenen Referenzwerten (eigene Berechnung; Datengrundlage für Referenzwerte: Statistisches Bundesamt 2008a; Umweltbundesamt 2012a, 2012c); km² entsprechen der Siedlungsfläche für Wohnzwecke

Indikator auf Ebene 4 (Typ-A-Aggregat)		Einheit	Mittelwert über Basis-szenarien	Referenzwert	Abweichung vom Referenzwert	Unsicherheit gemäß Struschka u. a. (2008)	Max. Abweichung vom Mittelwert in den Basis-szen.	Abweichung vom Mittelwert in Szenario		
Emissionen an								I	II	III
A ₁₂₁₁	CO ₂ (inkl. Biomasse)	Tg/a	128,51	133,10	-3%	-	0%	-3%	4%	10%
A ₁₂₁₂	CO ₂ (exkl. Biomasse)	Tg/a	117,74	113,44	4%	-	0%	-3%	4%	10%
A ₁₂₁₃	CH ₄	Gg/a	11,86	25,46	-53%	>20%	2%	0%	0%	9%
A ₂₂₁₁	NO _x	t/(km ² a)	0,06	0,06	-4%	20%-70%	0%	-5%	5%	9%
A ₂₂₁₂	SO ₂	t/(km ² a)	0,05	0,05	-4%	20%-90%	0%	-4%	4%	10%
A ₂₁₁₃	VOC	t/(km ² a)	0,01	0,03	-58%	20%-70%	2%	-4%	2%	9%
A ₂₂₁₃	NMVOC	t/(km ² a)	0,01	0,03	-58%	>60%	2%	-4%	2%	9%
A ₂₂₁₅	PM	t/(km ² a)	0,01	0,02	-36%	>20%	1%	-4%	3%	10%

Gesundheitliche Auswirkungen und Schäden durch Luftschadstoffe hängen großteils von der Exposition ab. Bspw. reichen Schadensschätzungen für PM-

¹⁸⁵ In dieser Arbeit werden Emissionen exkl. bzw. inkl. Emissionen aus Biomasse auch verkürzt als Emissionen exkl. bzw. inkl. Biomasse bezeichnet.

Emissionen aus Kleinf Feuerungen in Deutschland von 20 k€/t außerorts über 36 k€/t in Städten bis zu 100 k€/t in Großstädten (Maibach u. a. 2007).

Daher wurden die auf die Siedlungsfläche für Wohnzwecke bezogenen Emissionen an NO_x, SO₂, VOC, NMVOC und PM auf Gemeindeebene berechnet und anschließend räumlich aggregiert (vgl. Abschnitt 6.1.4). Mittelwert und maximale Abweichung vom Mittelwert für 20 Basisszenarien sind in Tabelle 109 angegeben.

Tabelle 109: Mittelwert, 90%-Quantil und Maximum von Luftschadstoffemissionen auf Gemeindeebene als Mittelwert über 20 Basisszenarien sowie als Maximum des Betrags der relativen Abweichung von diesem Mittelwert

Räumliche Aggregation	Gemeindegrößenklasse [Tausend Einwohner]	NO _x		SO ₂		VOC		NMVOC		PM	
		Mittelwert [kg/(km ² a)]	Maximum des Betrags der rel. Abweichung	Mittelwert [kg/(km ² a)]	Maximum des Betrags der rel. Abweichung	Mittelwert [kg/(km ² a)]	Maximum des Betrags der rel. Abweichung	Mittelwert [kg/(km ² a)]	Maximum des Betrags der rel. Abweichung	Mittelwert [kg/(km ² a)]	Maximum des Betrags der rel. Abweichung
Mittelwert	<5	95	1%	85	1%	65	3%	40	4%	38	4%
	5-20	72	1%	59	1%	37	5%	21	7%	21	4%
	20-100	85	0%	57	1%	23	5%	12	7%	10	7%
	100-500	26	1%	14	2%	4	7%	2	14%	1	19%
	≥500	98	2%	79	3%	31	17%	20	24%	16	27%
	Alle	40	1%	38	1%	23	5%	14	9%	11	6%
90%-Quantil	<5	158	1%	146	3%	130	4%	82	5%	73	7%
	5-20	109	1%	94	2%	58	6%	32	4%	30	2%
	20-100	123	1%	85	1%	35	4%	19	7%	18	4%
	100-500	40	2%	23	2%	6	13%	2	16%	1	21%
	≥500	167	2%	132	4%	59	21%	40	29%	30	30%
	Alle	63	1%	62	1%	32	6%	19	11%	16	6%
Maximum	<5	4.897	2%	3.854	3%	2.970	13%	1.861	21%	1.664	15%
	5-20	2.306	4%	1.368	8%	1.327	21%	803	30%	865	21%
	20-100	1.186	2%	638	7%	555	20%	305	38%	233	26%
	100-500	56	3%	30	3%	8	26%	4	28%	2	61%
	≥500	231	2%	183	4%	82	21%	56	29%	42	30%
	Alle	125	1%	117	2%	60	8%	35	12%	27	12%
Alle	4.897	2%	3.854	3%	2.970	13%	1.861	21%	1.664	15%	

Wie erwartet steigt die Unsicherheit bzw. die maximale Abweichung in den Modellergebnissen von (räumlichen) Mittelwerten zu 90%-Quantilen und Maxima. Zudem steigt die Unsicherheit der Mittelwerte mit steigender Gemeindegrößenklasse aufgrund geringerer Fallzahlen mit Abweichungen von mehr als 10% für VOC, NMVOC und PM. Gemeinden mit 100.000 bis 500.000 Einwohn-

nern weisen die niedrigsten spezifischen Emissionen auf. Ein Grund könnte ein niedrigerer Anteil an Festbrennstoffen in größeren Gemeinden sein. Ein Vergleich von Mittelwerten, 90%-Quantilen und Maxima zeigt, dass 90%-Quantile grob den doppelten und Maxima grob den 50-fachen Mittelwerten entsprechen. In letzterem Falle steigen die Unsicherheiten aber grob nur auf das Sechsfache.

Die auf 20 Basisszenarien basierenden Korridore (definiert durch „Obergrenzen“ und „Untergrenzen“) für die Häufigkeitsverteilungen der durch die Wärmenutzung bedingten direkten Emissionen an CO₂ (inkl. bzw. exkl. Biomasse), NO_x, SO₂, NMVOC und PM sind in Abbildung 26 dargestellt. Die Breite der Verteilungen, bspw. 0 bis ca. 80 (kg CO₂)/(m² a), 0 bis ca. 50 (g NO_x)/(m² a), 0 bis ca. 70 (g SO₂)/(m² a) und 0 bis ca. 6 (g PM)/(m² a) verdeutlichen die Emissionsreduktionspotenziale energetischer Modernisierungen im Wohngebäudebestand. Sie zeigt allerdings auch, dass für drastische Emissionsreduktionen auf nationaler Ebene auch weitere Verbesserungen an Gebäuden mit unterdurchschnittlichen spezifischen Emissionen notwendig sind. Die relativ große Anzahl von Wohnungen mit keinen direkten Luftschadstoff- und CO₂-Emissionen exkl. Biomasse resultiert aus der Verwendung der Energieträger Fernwärme und Elektrizität. Die zusätzlichen Wohnungen beim Übergang von CO₂-Emissionen exkl. zu denjenigen inkl. Biomasse resultieren aus der biomassebasierten Wärmebereitstellung. Die Wohnungen mit knapp über 3 (kg CO₂)/(m² a) resultieren aus hoher Energieeffizienz der Gebäudehülle und/oder niedrigen (aber positiven) Emissionsfaktoren der Wärmeerzeuger.

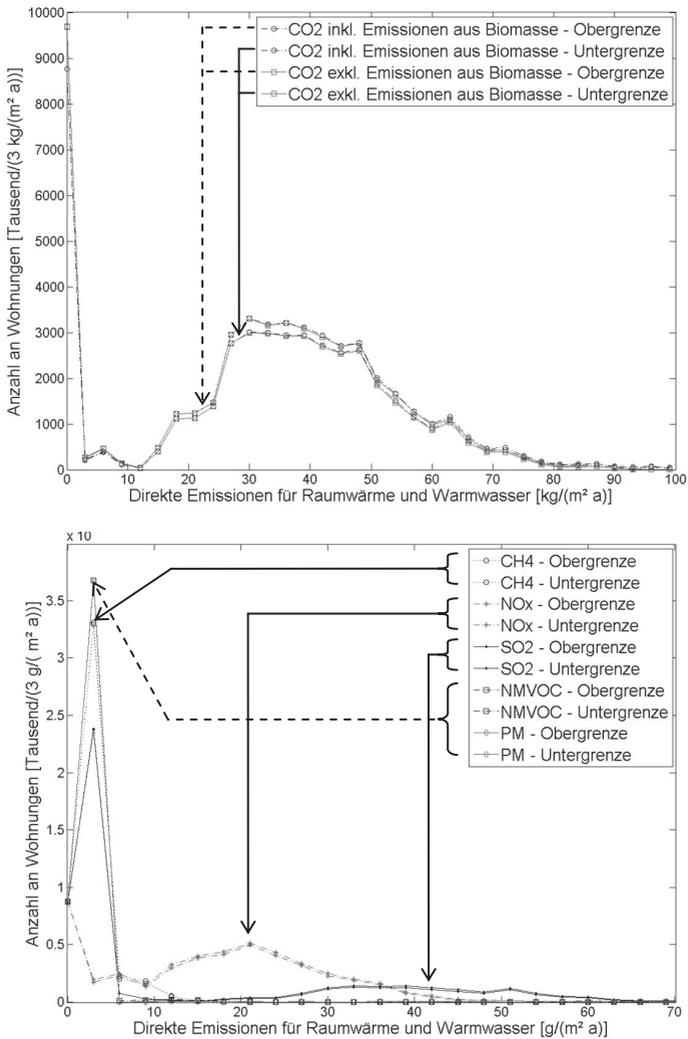


Abbildung 26: Unter- und Obergrenzen der Häufigkeiten von Wohneinheiten in Abhängigkeit von den direkten Emissionen für Raumwärme und Warmwasser im Jahr 2006 differenziert nach CO₂ inkl./exkl. Emissionen aus Biomasse (oben), CH₄, NO_x, SO₂, NMVOC und PM (unten) bei der Simulation von 20 Basisszenarien

Abbildung 27 zeigt den Anteil der PM-, CO₂-, NO_x-, SO₂-, VOC- und NMVOC-Emissionen des Emissionskatasters für Bayern (nicht genehmigungspflichtige Anlagen, 2000), der von den *AWOHM*-Ergebnissen (nur Wohngebäude) im Jahr 2006 auf Kreisebene abgedeckt wird. Da die nicht genehmigungspflichtigen Anlagen nicht nur Wohngebäude, sondern auch Gewerbe-, Handels- und Dienstleistungsgebäude abdecken, sollten die Anteile trotz des Vergleichs der Jahre 2006 und 2000 100% nicht überschreiten. In Bezug auf die PM-Emissionen sind die Modellergebnisse daher für ca. 20 Kreise (von 96) unplausibel. Für die übrigen Kreise und Emissionsarten kann dies nicht gefolgert werden. Hervorzuheben ist, dass die Bedeutung der Wohngebäude unter den nicht genehmigungspflichtigen Anlagen in der Mehrzahl der bayerischen Kreise von PM über CO₂, NO_x, SO₂, VOC zu NMVOC abnimmt.

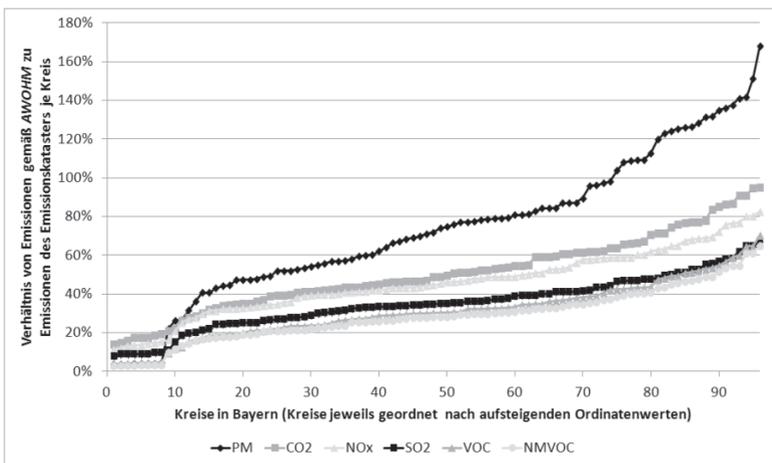


Abbildung 27: Anteil von Luftschadstoff- und Treibhausgasemissionen des Emissionskatasters für Bayern (nicht genehmigungspflichtige Anlagen, 2000), der von den *AWOHM*-Emissionen (nur Wohngebäude) im Jahr 2006 auf Kreisebene abgedeckt wird (eigene Berechnung; Datengrundlage für Vergleichswerte: Bayerisches Landesamt für Umwelt 2000)

Abbildung 28 zeigt den Betrag maximaler Kenngrößenabweichung von dem zugehörigen Mittelwert bei der Simulation von 20 Basisszenarien für mehrere

Kenngrößen auf Wohnungsebene im Jahr 2006. Auf der Ebene einzelner Wohnungen liegt der Betrag der maximalen Abweichung des Endenergieverbrauchs für 90% der Gebäude (nur) unter 50%. Damit sind Aussagen auf Mikroebene, im Gegensatz zu Aussagen über die Häufigkeitsverteilung von Kenngrößen auf Mikroebene, mit großen Unsicherheiten verbunden. Diese Unsicherheiten nehmen ausgehend vom Endenergieverbrauch über die Wärmekosten der Mieter sowie Emissionen an CO₂, SO₂, PM, NMVOC und NO_x bis zu Emissionen an CH₄ zu bzw. über den Primärenergieverbrauch bis zum Haushaltsnettoeinkommen abzüglich Energiekosten für Selbstnutzer und Mieter ab.

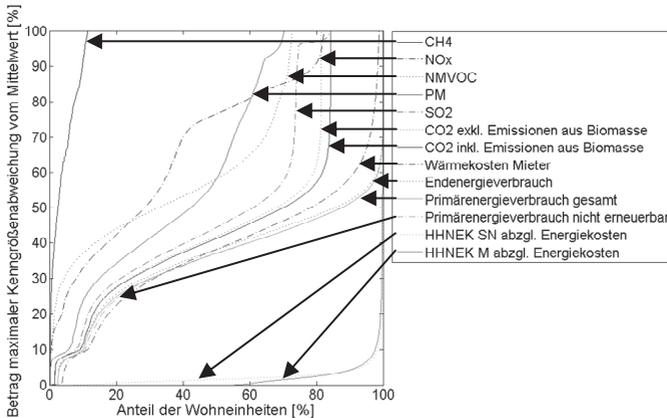


Abbildung 28: Betrag maximaler Kenngrößenabweichung von dem zugehörigen Mittelwert bei der Simulation von 20 Basisszenarien für mehrere Kenngrößen auf Wohnungsebene im Jahr 2006 in Abhängigkeit vom Anteil der betrachteten Wohneinheiten; Energiekosten beziehen sich auf Raumwärme und Warmwasser; HHNEK: Haushaltsnettoeinkommen; M: Mieter; SN: Selbstnutzer

7.1.6 Verfügbares Einkommen nach Wohnen

Tabelle 110 zeigt Mittelwert und 20%-Quantil des mittleren verfügbaren Einkommens nach Wohnen für das Jahr 2006 differenziert nach Selbstnutzern und Mietern (vgl. Abschnitt 6.1.5). Bei Selbstnutzern wurde dabei das Haushaltsnettoeinkommen abzüglich Energiekosten für Raumwärme und Warmwasser angesetzt. Im Falle der Mieter wurde zudem die Kaltmiete abgezogen.

Diese Kennwerte, die auch in die nachhaltigkeitsorientierte Bewertung einfließen, sind in dem Sinne stabil, dass bei 20 Basisszenarien die maximale Abweichung vom Mittelwert maximal 0,2% beträgt und auch beim Vergleich der Szenarien I, II und III maximal eine Abweichung von -1,2% auftritt. Letztere resultiert aus einer Erhöhung der Raumsolltemperatur um 1°C. Die Unsicherheit der 20%-Quantile, d. h. der Kennwerte für einkommensschwache Haushalte, ist ca. doppelt so groß wie diejenige der Mittelwerte.

Tabelle 110: Vergleich von Indikatoren der Einkommensverteilung nach Wohnen auf nationaler Ebene für das Jahr 2006 für mehrere Szenarien gemäß *AWOHM*; WW: Warmwasser; *: im Jahr 2006 ist diese 0

Indikator auf Ebene 4 (Typ-A-Aggregat)	Einheit	Mittelwert über Basisszenarien	Max. Abweichung vom Mittelwert in den Basisszen.	Abweichung vom Mittelwert in Szenario		
				I	II	III
A ₃₁₁₁ Mittleres verfügbares Einkommen von Selbstnutzern abzüglich Energiekosten für Raumwärme und WW sowie der Abnutzung der Investition*	€/ (Monat Person)	1.094	0,0%	0,2%	-0,2%	-0,5%
A ₃₁₁₂ 20%-Quantil des verfügbaren Einkommens von Selbstnutzern abzüglich Energiekosten für Raumwärme und WW sowie der Abnutzung der Investition*	€/ (Monat Person)	561	0,1%	0,3%	-0,3%	-0,9%
A ₃₁₂₁ Mittleres verfügbares Einkommen von Mietern abzüglich Energiekosten für Raumwärme und WW sowie Kaltmiete	€/ (Monat Person)	695	0,0%	0,2%	-0,3%	-0,6%
A ₃₁₂₂ 20%-Quantil des verfügbaren Einkommens von Mietern abzüglich Energiekosten für Raumwärme sowie Kaltmiete	€/ (Monat Person)	283	0,2%	0,3%	-0,6%	-1,2%

Abbildung 29 zeigt die Häufigkeitsverteilung der Haushaltsnettoeinkommen auf Haushaltsebene differenziert nach Selbstnutzern und Mietern. Der Modalwert ist bei Selbstnutzern und Mietern mit ca. 1.000 €/ (Monat Person) relativ ähnlich, wobei bei Selbstnutzern wegen der Verteilungsform ein höherer Mittelwert zu erwarten ist. Auch die Verschiebung durch Abzug der Energiekosten ist relativ ähnlich. Durch den Abzug der Kaltmiete ist bei Mietern eine weitere Verschiebung zu erkennen, der allerdings bei Selbstnutzern entsprechende, in *AWOHM* nicht berücksichtigte Aufwendungen gegenüberstehen. Die Verteilungskurven sind sowohl für Selbstnutzer als auch für Mieter hinsichtlich der durch nicht-deterministische Berechnungsvorschriften induzierten Unsicherheiten stabil.

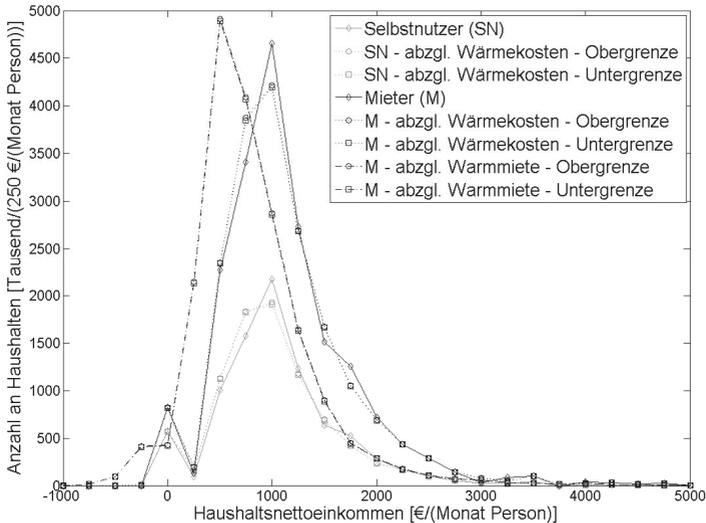


Abbildung 29: Unter- und Obergrenzen der Häufigkeiten von Haushalten in Abhängigkeit vom Haushaltsnettoeinkommen im Jahr 2006 differenziert nach Selbstnutzer und Mieter ohne Abzug, abzüglich Energiekosten für Raumwärme und Warmwasser sowie abzüglich der Warmmiete (nur bei Mietern) bei der Simulation von 20 Basisszenarien

7.1.7 Warme Nebenkosten

In *AWOHM* stehen neben den berechneten Energiekosten für Raumwärme und Warmwasser im Jahr 2006 für vermietete Wohnungen auch im SUF des Mikrozensus 2006 angegebene warme Nebenkosten zur Verfügung, die zur Plausibilisierung auf Haushaltsebene herangezogen werden können. Die Gegenüberstellung der jeweiligen Häufigkeitsverteilungen in Abbildung 30 zeigt eine prinzipiell gute Übereinstimmung der warmen Nebenkosten gemäß Mikrozensus 2006 mit den *AWOHM*-Modellergebnissen, obwohl die Systemgrenzen voneinander abweichen können (vgl. nächster Absatz). Die warmen Nebenkosten werden jedoch tendenziell unterschätzt, was u. a. durch eine Unterschätzung der Energiepreise oder des Energieverbrauchs erklärt werden kann. Am häufigsten sind in beiden Fällen Kosten von 10 bis 20 €/m² a). Werte unter 3

und über 30 €/m² a sind dagegen selten. Anhand des auf 20 Basisszenarien basierenden Korridors für die Häufigkeitsverteilung der berechneten Energiekosten wird zudem ersichtlich, dass diese Verteilung relativ stabil ist.

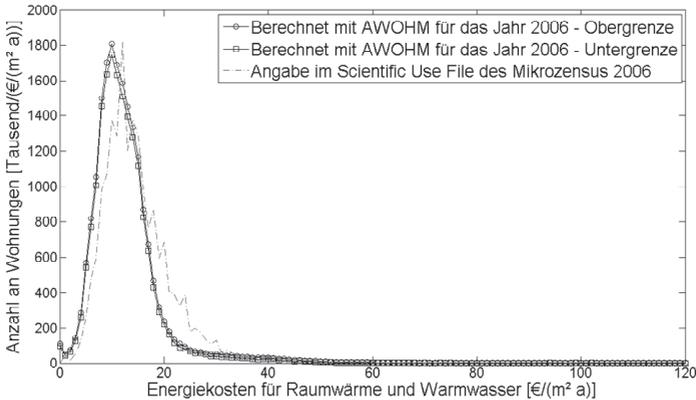


Abbildung 30: Vergleich der Energiekosten für Raumwärme und Warmwasser in vermieteten Wohnungen anhand der Unter- und Obergrenze der Anzahl an Wohnungen gemäß *AWOHM* im Jahr 2006 bei der Simulation von 20 Basisszenarien und den im SUF des Mikrozensus 2006 angegebenen warmen Nebenkosten

Abbildung 31 zeigt den Korridor der Häufigkeitsverteilungen des Verhältnisses der berechneten Energiekosten zu den im Mikrozensus 2006 angegebenen warmen Nebenkosten für das Jahr 2006. Das Verhältnis reicht von 0 bis 500% mit einem Modalwert von 70%. 39% der Haushalte haben ein Verhältnis zwischen 70% und 130%, 64% zwischen 50 und 150% und 88% zwischen 20 und 180%. Die Gründe für diese Abweichungen sind vielfältig. Da es sich um von den Befragten angegebene warme Nebenkosten handelt, basieren sie auf Verbrauchswerten, aber etwaige Nachzahlungen sind ggf. nicht berücksichtigt. Energiekosten für die Warmwasserbereitung und Nebenfeuerstätten sind manchmal beinhaltet und manchmal nicht. Außerdem beziehen sich die Kosten teilweise auf überholte Nutzungsverhältnisse. Zudem berücksichtigen die SUF-Daten im Gegensatz zu *AWOHM* regionale und vertragsabhängige Unterschiede in Energiepreisen, Nutzerverhalten (Innenraumtemperaturen, Warmwas-

serverbrauch, Lüftung, innere Wärmegewinne etc.), Variationen in Außentemperaturen und Solarstrahlungen, die tatsächliche technische Gebäudespezifikation (ohne Zufallsziehungen) etc. Die Spannweite des Korridors zeigt, dass die Verteilung wiederum relativ stabil ist. Aussagen auf Mikroebene sind allerdings mit Bedacht zu interpretieren.

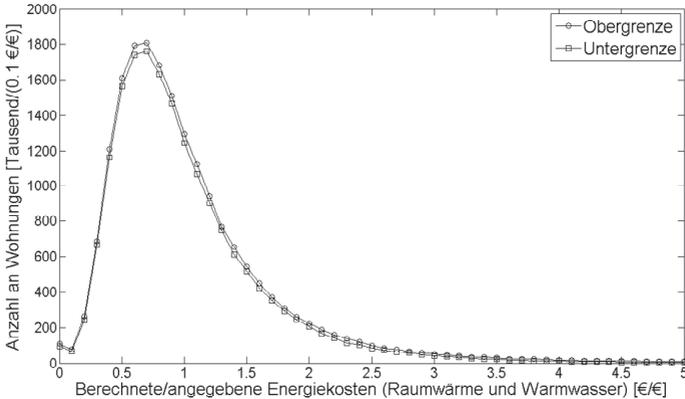


Abbildung 31: Unter- und Obergrenzen der Anzahl an Wohnungen in Abhängigkeit vom Verhältnis von in *AWOHM* für das Jahr 2006 berechneten Energiekosten für Raumwärme und Warmwasser zu den im SUF des Mikrozensus 2006 angegebenen warmen Nebenkosten bei der Simulation von 20 Basisszenarien

7.1.8 Schlussfolgerungen

Ein zentrales Problem bei der Modellierung ist die Validierung bzw. Plausibilisierung. Exogene Daten zur Plausibilisierung stehen überwiegend auf nationaler Ebene zur Verfügung. Ein Vergleich von Wohnflächen und Wohneinheitenanzahl aus *AWOHM* mit exogenen Daten zeigte auf nationaler und auf Bundeslandebene geringe Abweichungen. Bei weiterer Differenzierung nach Gebäudetypen und Baualtersklassen nahmen die Abweichungen allerdings zu, wobei auch die Verlässlichkeit der exogenen Daten sank. Ein Vergleich der Wärmeerzeugeranzahl mit exogenen Daten zeigte für *AWOHM* eine größere Anzahl an Öl- und Gaskesseln sowie mit Holz, Pellets und Braunkohlebriketts befeuerten Heizkesseln. Häufig als Nebenfeuerstätten eingesetzte und auf Steinkohlebri-

ketts, Steinkohle oder Steinkohlekoks basierende Wärmeerzeuger wurden dahingegen unterschätzt. Der Anteil der Wohneinheiten mit nachträglicher energetischer Verbesserung von oberem und unterem Gebäudeabschluss sowie Außenwänden zeigt nur geringe Abweichungen zu exogenen Daten. Bei Fenstern wurde die bisherige Sanierungsaktivität dahingegen unterschätzt, sodass *ceteris paribus* von einer leichten Überschätzung der verbleibenden Einsparpotenziale ausgegangen werden kann.

Die Abweichungen des Endenergieverbrauchs von Vergleichswerten der nationalen Energiebilanz sind kleiner als 7% für die Energieträger Öl, Gas, Elektrizität und Braunkohle sowie 23% für Fernwärme. Der Verbrauch an Holz (u. a. erneuerbaren Energien) sowie Steinkohle wird dahingegen um 47% bzw. 67% unterschätzt, da Nebenfeuerstätten (häufig Kamine und Kaminöfen) in *AWOHM*, bedingt durch die Datenlage, nicht berücksichtigt wurden. Obwohl diese Energieträger hinsichtlich des Energieverbrauchs (im Falle von Holz bzw. Holzpellets noch) von untergeordneter Bedeutung sind, verursacht deren Unterschätzung beträchtliche Abweichungen in den Schätzungen derjenigen Luftschadstoffemissionen, für die Nebenfeuerstätten eine Hauptquelle sind. Daher werden die NMVOC- und PM-Emissionen um 58% bzw. 37% unterschätzt. Die Unsicherheit für die Emissionen an NO_x, SO₂ und CO₂ sind dahingegen auf nationaler Ebene kleiner als 4%.

Ein Vergleich auf Kreisebene zeigte für Bayern, dass die Luftschadstoffemissionen aus Wohngebäuden gemäß *AWOHM* in den meisten Fällen die exogene obere Schranke von Emissionen für nicht genehmigungspflichtige Anlagen, die auch Nicht-Wohngebäude betreffen, nicht überschreiten. Bez. der Häufigkeitsverteilung der Energiekosten in deutschen Haushalten zeigen die *AWOHM*-Ergebnisse bei leichter Unterschätzung eine gute Übereinstimmung mit den von Mietern im SUF 2006 angegebenen warmen Nebenkosten. Die Gegenüberstellung von Energiekosten und angegebenen warmen Nebenkosten auf Haushaltsebene zeigt allerdings Abweichungen von -100% bis +500%. Für 39%, 64% bzw. 88% aller Haushalte liegt diese Unsicherheit nur bei +/-30%,

+/-50% bzw. +/-80%. Daher sollten die Modellergebnisse nicht für Aussagen zu individuellen Haushalten, sondern für Aussagen zu Haushaltsgruppen genutzt werden.

Manuell definierte Szenarien

Durch die Variation der Sanierungszyklen, der Wohneinheitenanzahl pro Etage, der Wärmeerzeugeranzahl pro Wohneinheit und der Raumsolltemperatur können die Abweichungen zu einigen der zur Plausibilisierung von *AWOHM* herangezogenen Daten reduziert werden. Bspw. können durch eine Erhöhung der Raumsolltemperatur um 1°C die Emissionen um ca. 10% erhöht werden. In der Folge sinkt die Unterschätzung der PM-Emissionen. Allerdings steigen damit auch die Emissionen zuvor bereits überschätzter Emissionsarten wie bspw. CO₂ (exkl. Biomasse) weiter an.

Zufallsziehungsbedingte Unsicherheit

Die integrierte Abbildung von Gebäuden und Haushalten auf Mikroebene erfordert die Kombination mehrerer Datensätze. Die hierfür notwendigen Annahmen induzieren jedoch Unsicherheiten. In *AWOHM* wurden Datensätze unterschiedlicher Quellen auf Mikroebene über Zufallsziehungen, d. h. nicht-deterministische Modellgleichungen, zugeordnet. Der hierdurch bedingte Anstieg in der Unsicherheit kann weder den *Datenunsicherheiten* noch den *Modellunsicherheiten* (vgl. Abschnitt 5.6.2) klar zugeordnet werden. Die Ergebnisse zeigen, dass die zufallsziehungsbedingten Unsicherheiten der strukturellen Daten und der Indikatoren des Startbestands nicht vernachlässigbar sind und stark zwischen den analysierten Parametern sowie den räumlichen Auflösungen variieren. Daher war eine intensive Plausibilisierung des Startbestands notwendig, um eine Basis für die Interpretation simulierter dynamischer Entwicklungspfade zu schaffen. Zufallsziehungen wurden für die Bestimmung des Gebäudetyps, der Wärmeerzeugertypen und der energetischen Qualität der Gebäudehüllenkomponenten eingesetzt. Entsprechend sind die Unsicherheiten für Indikatoren am größten, die sensitiv auf Variationen in all diesen Bereichen

reagieren, wie bspw. bei den Luftschadstoffemissionen. Für die meisten Endenergieträger und damit auch Energiekosten, verfügbares Einkommen nach Wohnen sowie CO₂-Emissionen liegt die zufallsziehungsbedingte Unsicherheit auf nationaler Ebene unter 1%. Die höchsten zufallsziehungsbedingten Unsicherheiten ergaben sich für Emissionen an VOC, NMVOC und PM, die sowohl von Gebäudetyp und -hülle als auch vom Wärmeerzeugertyp maßgeblich beeinflusst werden. Die Unsicherheit steigt, wenn die räumliche Auflösung auf Gemeindeebene mit anschließender Aggregation differenziert nach Gemeindegrößenklassen erhöht wird. Dabei hängt die Höhe der Unsicherheit neben dem Indikator auch von der Gemeindegrößenklasse und der Aggregationsfunktion ab, mit der höchsten Unsicherheit für die Maxima, gefolgt von den 90%-Quantilen und den Mittelwerten. Doch selbst für die Maxima sind die Unsicherheiten niedriger als diejenigen der verwendeten Emissionsfaktoren.

Die Häufigkeitsverteilungen für End- und Primärenergieverbrauch, Treibhausgas- und Luftschadstoffemissionen, Energiekosten, das Verhältnis von berechneten zu im SUF 2006 angegebenen Energiekosten, Haushaltsnettoeinkommen abzüglich Energiekosten bzw. Warmmiete – jeweils je Haushalt – weisen alleamt, im Gegensatz zu den Ergebnissen auf Mikroebene, geringe zufallsziehungsbedingte Unsicherheiten auf.

Insgesamt sind die zufallsziehungsbedingten Unsicherheiten von ähnlicher Größe wie andere den Daten inhärente Unsicherheiten und sind somit kein Ausschlusskriterium für die Nutzung räumlich oder anderweitig differenzierter Modellergebnisse. Die Daten sollten allerdings nicht überinterpretiert werden. Zufallsziehungen induzieren immer Unsicherheiten, die für einzelne Objekte groß sind, aber mit zunehmender Stichprobengröße abnehmen. Je aggregierter demnach die verwendeten Modellergebnisse sind, desto niedriger ist die Unsicherheit. Ein Vorteil des Ansatzes ist diesbezüglich (vorbehaltlich der Annahmen) die Quantifizierbarkeit der Unsicherheiten.

Fazit

Insgesamt erzeugt das *Bottom-Up*-Modell *AWOHM* plausible Ergebnisse für den Startbestand im Jahr 2006, wobei teilweise systemgrenzenbedingte Probleme auftreten. Daher sollte auf die adäquate Interpretation der Modellergebnisse geachtet werden. *AWOHM* stellt für die Umweltpolitikgestaltung wertvolle Informationen auf aggregierter nicht notwendiger Weise nur nationaler Ebene zur Verfügung. Eine Anwendung von *AWOHM* für die Analyse konkreter individueller Haushalte und Gebäude sollte allerdings wegen zu großer Unsicherheiten unterbleiben.

7.2 Technisches Potenzial

Dieser Abschnitt hat einen Bezug zu folgenden (Teil-)Forschungsfragen:

- Wie groß sind die *technischen* Reduktionspotenziale für Treibhausgas- und Luftschadstoffemissionen sowie den Primärenergieverbrauch?
- Hinsichtlich welcher Teilbereiche der Nachhaltigkeitsbewertung treten Zielkonflikte auf?

In Abschnitt 7.2.1 werden Szenarien definiert, mittels derer in Abschnitt 7.2.2 bis zum Jahr 2030 die technischen Minderungspotenziale für die mit der Nutzung des Wohngebäudebestands in Deutschland verbundenen Emissionen an Treibhausgasen und Luftschadstoffen sowie für den Primärenergieverbrauch abgeschätzt werden. Das technische Potenzial sei definiert als maximale Emissionsminderung bzw. Primärenergieverbrauchsreduktion bei den in *AWOHM* vorgegebenen technischen Möglichkeiten und Beibehaltung der zeitlichen Kopplung von Modernisierungsmaßnahmen an die Sanierungszyklen von Gebäudehülle und Anlagentechnik. Dabei werden die Treibhausgase CO₂ und CH₄, die Luftschadstoffe PM, NO_x, SO₂ und NMVOC sowie der nicht erneuerbare und der gesamte Primärenergieverbrauch unterschieden. Durch die Bestimmung der technischen Minderungspotenziale können u. a. Zielkonflikte zwischen den technischen Potenzialen aufgedeckt, ein Kompromiss zwischen den Zielkonflikten als „das“ technische Minderungspotenzial definiert und somit Ver-

gleichswerte bzw. Obergrenzen für ökonomische und ausschöpfbare Potenziale bestimmt werden. Die mit *AWOHM* bestimmten Minderungspotenziale werden, soweit möglich, in Abschnitt 7.2.3 mittels Literaturdaten plausibilisiert. Auf die Identifizierung von Abhängigkeiten auf Mikroebene gemäß dem in Abschnitt 6.2.6 beschriebenen Ansatz wird in Abschnitt 7.2.4 eingegangen.

7.2.1 Szenarien

Tabelle 111 ist die Definition neun technischer Potenzialszenarien zu entnehmen, d. h. derjenigen Szenarien, die zur Bestimmung der technischen Potenziale eingesetzt werden. Die Definition erfolgt in Bezug auf die Basisszenarien (vgl. Tabelle 99 in Abschnitt 7.1), wobei nur von den Basisszenarien abweichende Szenarioelemente spezifiziert werden. Die Abweichungen beschränken sich auf die Entscheidungsansätze, die die Grundlage für die Entscheidung der als Akteure abgebildeten Gebäudeeigentümer bilden. Jedem Szenario, das zur Bestimmung eines technischen Potenzials eingesetzt wird, wird ein entsprechender Potenzialakteurstyp zugeordnet (vgl. Abschnitt 5.4.4). Bspw. handeln im Szenario *TP¹⁸⁶ PM* alle Gebäudeeigentümer gemäß dem Entscheidungsansatz *Min PM*, d. h. sie wählen diejenige Kombination aus Gebäudehülle und/oder Anlagentechnik, die zu den niedrigsten durch die Bereitstellung von Raumwärme und Warmwasser bedingten direkten PM-Emissionen des Gebäudes führt. Im Falle von CO₂, CH₄, NO_x, SO₂, NMVOC, nicht erneuerbarem Primärenergieverbrauch und (gesamtem) Primärenergieverbrauch erfolgt die Szenariodefinition analog. Da Zielkonflikte zwischen diesen Potenzialen existieren können, wird mit dem Szenario *TP Kompromiss* ein Kompromiss zwischen diesen angestrebt. Die genaue Spezifikation dieses Szenarios und des zugrundeliegenden Potenzialakteurstyps erfolgt in Abhängigkeit von den aufgedeckten Zielkonflikte.

¹⁸⁶ TP steht für Technisches Potenzial.

Tabelle 111: Definition der Szenarien zur Bestimmung der technischen Potenziale (technische Potenzialszenarien) durch Spezifikation der von den Basisszenarien abweichenden Szenarioelemente

Kürzel	Szenario name (TP: Technisches Potenzial)	Entscheidungsansätze (alle Eigentümerstrukturen)
T1	TP CO ₂	Min CO ₂
T2	TP CH ₄	Min CH ₄
T3	TP NO _x	Min NO _x
T4	TP SO ₂	Min SO ₂
T5	TP NMVOC	Min NMVOC
T6	TP PM	Min PM
T7	TP Primärenergie nicht erneuerbar	Min nicht erneuerbarer Primärenergiebedarf
T8	TP Primärenergie	Min Primärenergiebedarf
T9	TP Kompromiss	Technischer Kompromiss

7.2.2 Emissionsminderungs- und Energieeinsparpotenziale

Die Reduktionen der direkten¹⁸⁷ Luftschadstoff- und Treibhausgasemissionen sowie des Primärenergieverbrauchs sind für die technischen Potenzialszenarien in Tabelle 112 angegeben. Zum Zwecke der Plausibilisierung wird zudem die Endenergieverbrauchsreduktion ausgewiesen. Die Reduktionen beziehen sich auf die Bereitstellung von Raumwärme und Warmwasser von 2006 bis 2030. Die technischen Reduktionspotenziale im Bereich Wärmenutzung in Wohngebäuden liegen für Treibhausgasemissionen bei 49% für CO₂ und 73% für CH₄, für Luftschadstoffemissionen bei 85% für SO₂, 75% für NO_x, 79% für PM und 71% für NMVOC. Die Reduktionspotenziale des gesamten bzw. nicht erneuerbaren Primärenergiebedarfs liegen bei 46% bzw. 76%. Die maximalen Minderungen des Endenergieverbrauchs und der Emissionen an CO₂ exkl. Biomasse entsprechen nur Näherungen des technischen Potenzials und betragen 41% und 85%.

¹⁸⁷ Zur Quantifizierung der gesamten Umweltentlastung müssten die indirekten Emissionen berücksichtigt werden. In *AWOHM* werden diese nicht berücksichtigt (Quellenprinzip), da die Luftschadstoffemissionen auf die Siedlungsfläche für Wohnzwecke bezogen werden und nicht davon ausgegangen werden kann, dass die indirekten Emissionen im Wohngebiet anfallen. Im Falle von CO₂ führt diese Wahl der Systemgrenzen allerdings insbesondere bei den Energieträgern Elektrizität und Fernwärme zu Interpretationsproblemen in Bezug auf das technische Potenzial. Ein Wechsel zu Elektrizität und Fernwärme wird allerdings in *AWOHM* ausgeschlossen, sodass die Auswirkungen auf die simulierten Sanierungsentscheidungen vernachlässigbar sind. Vgl. Abschnitt 8.2 (Kritische Würdigung des Modells).

Tabelle 112: Reduktionen der direkten verbrennungsbedingten CO₂-, CH₄-, NO_x-, SO₂-, NMVOC- und PM-Emissionen sowie des End- und Primärenergieverbrauchs des Wohngebäudebestands in Deutschland für Raumwärme und Warmwasser von 2006 bis 2030 in den technischen Potenzialszenarien

Indikator	Reduktion bis 2030 in Bezug auf 2006 [%]									
	Emissionen							Energieverbrauch		
Szenario	CO ₂	CO ₂ (exkl. Biomasse)	CH ₄	NO _x	SO ₂	NMVOC	PM	End	Primär (nicht ern.)	Primär (gesamt)
TP CO ₂	49	49	-4	75	85	71	79	41	44	42
TP CH ₄	42	42	73	46	84	67	79	39	42	41
TP NO _x	49	49	-4	75	85	71	79	41	43	42
TP SO ₂	49	49	-4	75	85	71	79	41	43	42
TP NMVOC	48	47	11	66	85	71	79	41	43	42
TP PM	49	49	-4	75	85	71	79	41	44	42
TP Primärenergie nicht erneuerbar	14	85	64	-28	77	61	43	37	76	46
TP Primärenergie	15	85	64	-26	77	61	44	37	76	46
TP Kompromiss	49	49	-4	75	85	71	79	41	43	42
Min	14	42	-4	-28	77	61	43	37	42	41
Max	49	85	73	75	85	71	79	41	76	46

Die Reduktionspotenziale sind (neben Abbruch und Neubau) auf energetische Modernisierungen der Gebäudehüllen, Erhöhungen der Jahresnutzungsgrade der Wärmeversorgungsapakete, Leerstand sowie Reduktionen der Primärenergie- und Emissionsfaktoren zurückzuführen. In den betrachteten Szenarien wird die Sanierungsentscheidung nicht durch ökonomische Indikatoren beeinflusst, sodass in allen Szenarien, gekoppelt an die Sanierungszyklen, die gesamte Gebäudehülle energetisch modernisiert und jeweils die Varianten mit den niedrigsten Wärmedurchgangskoeffizienten gewählt werden. Daraus resultiert die geringe Schwankung der Endenergieverbrauchsreduktionen von 37% bis 41%. Die Sanierungsentscheidungen können sich zwischen den Szenarien in der Wahl der Wärmeversorgungsapakete unterscheiden. Tendenziell sind die Reduktionspotenziale umso größer, je stärker sich die Primärenergie- und Emissionsfaktoren der Wärmeerzeugerapakete unterscheiden. Daher steigen die Reduktionspotenziale vom End- und gesamten Primärenergieverbrauch (41% bzw. 46%) über die CO₂-Emissionen (49%) bis zum nicht erneuerbaren Primärenergieverbrauch (76%) sowie den Emissionen an CO₂ exkl. Biomasse (85%), CH₄ (73%) und Luftschadstoffen (71-85%) an.

Da den angegebenen technischen Reduktionspotenzialen nicht immer dieselben Maßnahmenpakete zugrundeliegen, können Zielkonflikte entstehen, wie bspw. zwischen nicht erneuerbarem und gesamtem Primärenergieverbrauch sowie Emissionen an CH₄ und CO₂ exkl. Biomasse auf der einen (vgl. *TP Primärenergie*) und Endenergieverbrauch sowie NO_x-, SO₂-, NMVOC-, PM- und CO₂-Emissionen inkl. Biomasse auf der anderen Seite (vgl. *TP NO_x*). Im Szenario *TP Primärenergie* nimmt die Nutzung von Biomasse zu, da trotz der Berücksichtigung des im Vergleich zu Brennwertgeräten niedrigeren Jahresnutzungsgrades von Holzpelletkesseln eine Kombination aus Pelletkessel und Solarthermiekollektoren aufgrund des niedrigen Primärenergiefaktors zum niedrigsten nicht erneuerbaren und (mit Ausnahme von Fernwärme¹⁸⁸) gesamten Primärenergieverbrauch führt (die Abweichungen von 1% können durch die Zufallsziehungen bei der Bestandsveränderung erklärt werden). Dadurch sinken zudem die Emissionen an CO₂ exkl. Biomasse um 85%. Allerdings sinkt die Emissionsreduktion für CO₂ inkl. Biomasse, NO_x und PM im Vergleich zum Szenario *TP NO_x* von 49% auf 15%, von 75% auf -26% und von 79% auf 44%, sodass eine vertiefte Betrachtung von Herkunft und alternativer Verwendung der Biomasse von Relevanz wäre.

Die Szenarien *TP CO₂*, *TP NO_x*, *TP SO₂* und *TP PM* führen zu nahezu identischen Ergebnissen, da aufgrund der hohen Jahresnutzungsgrade und niedrigen CO₂-, NO_x-, SO₂- und PM-Emissionsfaktoren von Gasbrennwertgeräten mit Solarthermiekollektoren, sofern möglich, ein Energieträgerwechsel zu Gas und Solarthermie stattfindet. Im Szenario *TP CH₄* können die CH₄-Emissionen durch den verminderten Einsatz von Gasbrennwertgeräten im Vergleich zum Szenario *TP NO_x* um 73% reduziert statt um 4% erhöht werden. Die CH₄-Emissionen sind aber aufgrund eines *Global Warming Potential* 100 von 21 (IINAS 2013) und einer Emissionsmenge von ca. 2/10.000 der CO₂-Emissionen (Umweltbundesamt 2012a) von untergeordneter Bedeutung.

¹⁸⁸ Wechsel von oder zu Fernwärme sind in *AWOHM* ausgeschlossen.

Basierend auf dem aufgedeckten Zielkonflikt kann je nach Priorisierung als Kompromiss des technischen Potenzials eine Mischung aus den Szenarien *TP Primärenergie* und *TP NO_x* gewählt werden. Da im Szenario *TP NO_x* mit Ausnahme der zweitrangigen CH₄-Emissionen alle Emissionen um mindestens 49% sinken, wird dieses als *TP Kompromiss* gewählt und demzufolge auch der Entscheidungsansatz *Technischer Kompromiss* dem Entscheidungsansatz *Min NO_x* gleichgesetzt.

7.2.3 Plausibilisierung

Die *AWOHM*-Reduktionen in den technischen Potenzialszenarien reichen von 42% bis 85% für Emissionen an CO₂ exkl. Biomasse, -4% bis 73% für CH₄-Emissionen und 37% bis 41% für den Endenergieverbrauch. Für die durch die Bereitstellung von Raumwärme und Warmwasser bedingten CO₂-Emissionen (exkl. Biomasse) im Bereich der privaten Haushalte geben Matthes u. a. (2009) nach dem Quellenprinzip für die Jahre 2005 bis 2030 eine Reduktion von 25% für ein konservatives Szenario („Mit-Maßnahmen-Szenario“) und 69% für ein Extremszenario („Strukturwandel“-Szenario) an. Die Werte des Extremszenarios liegen damit innerhalb des von den *AWOHM*-Szenarien aufgespannten Bereichs. Gleiches gilt bei den CH₄-Emissionen, für die von Matthes u. a. (2009) für denselben Zeitraum ein Anstieg um 3% bzw. 6% berechnet wird. Für die Jahre 2006 bis 2030 geben Matthes u. a. (2009) Endenergieverbrauchsreduktionen von 20% bzw. 48% an. Die Energieverbrauchsreduktion ist in *AWOHM* mit maximal 41% geringer als die um 48% gemäß Matthes u. a. (2009). Dies kann möglicherweise dadurch erklärt werden, dass die Solarenergie in *AWOHM* als Bestandteil der Endenergie bilanziert wird.

7.2.4 Identifizierung von Abhängigkeiten

In diesem Abschnitt werden exemplarisch gemäß dem in Abschnitt 6.2.6 beschriebenen Vorgehen Abhängigkeiten zwischen Emissionen und Emissionsminderungen auf Gebäudeebene analysiert bzw. identifiziert. Tabelle 113 zeigt paarweise Korrelationen zwischen Emissionsreduktionen auf Gebäudeebene

im Szenario *TP NO_x*. Bei ausschließlicher Gebäudehüllenmodernisierung sollten die Emissionsreduktionen perfekt korreliert sein. Da in den meisten Fällen jedoch ein Austausch der Wärmeversorgungspakete anstand, ist dies nicht der Fall, wenn auch keine negativen Korrelationen auftreten. Da Emissionsreduktionen bei CO₂ exkl. Biomasse auch Emissionsreduktionen für CO₂ inkl. Biomasse implizieren, sind diese Emissionsreduktionen, wie erwartet, mit 0,85 stark korreliert. Die Reduktionen der Emissionen von CO₂ exkl. Biomasse und PM sind dahingegen nahezu unkorreliert, was insbesondere durch die im Vergleich starke Variation der PM-Emissionsfaktoren zwischen den Wärmeerzeugertypen bedingt ist. Insbesondere Festbrennstoffe führen zu deutlich höheren PM-Emissionen als flüssige und gasförmige Brennstoffe. PM-Emissionsreduktionen sind dahingegen am stärksten mit NMVOC-Emissionsreduktionen korreliert, die ebenfalls stark vom eingesetzten Energieträger abhängen. Die CH₄-Emissionsreduktionen weisen mit maximal 0,11 eine niedrige Korrelation mit allen anderen Emissionsarten auf.

Tabelle 113: Paarweise Korrelationen zwischen Emissionsreduktionen auf Gebäudeebene im Szenario *TP NO_x*

Emissionsart	CO ₂ (exkl. Biomasse)	CO ₂	CH ₄	PM	NO _x	SO ₂	NMVOC
CO ₂ (exkl. Biomasse)	1,00	0,85	0,06	0,02	0,30	0,13	0,03
CO ₂	-	1,00	0,11	0,09	0,49	0,15	0,10
CH ₄	-	-	1,00	0,04	0,05	0,01	0,10
PM	-	-	-	1,00	0,28	0,26	0,75
NO _x	-	-	-	-	1,00	0,32	0,23
SO ₂	-	-	-	-	-	1,00	0,32
NMVOC	-	-	-	-	-	-	1,00

Abbildung 32 zeigt für die Gebäudeebene exemplarisch ein Streudiagramm zu Emissionen an CO₂ (exkl. Biomasse) und PM im Jahr 2006 sowie im Jahr 2030 gemäß den beiden, die aufgedeckten Zielkonflikte repräsentierenden Szenarien *TP NO_x* und *TP Primärenergie*. Dargestellt sind nur Gebäude mit positiven PM-Emissionen. Vom Ursprung ausgehende Geraden, auf denen die Emissionskombinationen von mehreren Gebäuden liegen, können als Wärmeerzeugertypen interpretiert werden. Eine Verschiebung eines Gebäudes auf einer derartigen Geraden resultiert aus einer energetischen Verbesserung der Ge-

bäudehülle, während ein Wechsel des Wärmeversorgungspakets zu einem Sprung zwischen den Geraden führt.

Im Szenario *TP Primärenergie* (schwarze „o“, im Vordergrund) sind die direkten CO₂-Emissionen (exkl. Biomasse) häufig null, wobei im Vergleich zum Jahr 2006 (graue „x“, im Hintergrund) PM-Emissionen in derselben Größenordnung auftreten (vgl. horizontale schwarze Linie). Dies ist auf die intensive Verwendung von Holzpellets in diesem Szenario zurückzuführen. Durch die exogene Vorgabe der Energieträgerverteilung beim Neubau und wegen der hohen angesetzten Lebensdauern von Festbrennstofffeuerungen sind in diesem Szenario jedoch auch positive CO₂-Emissionen möglich, wobei die Geraden mit mittleren bzw. hohen Steigungen Festbrennstofffeuerungen bzw. Öl- und Gasfeuerungen (im Neubau) entsprechen.

Im Szenario *TP NO_x* (graue „+“, im Hintergrund) treten häufig sehr niedrige, aber positive PM-Emissionen auf (vgl. vertikale graue Linie), was auf die intensive Verwendung von Gasbrennwertkesseln zurückzuführen ist, die niedrige PM-Emissionsfaktoren aufweisen. Die teils hohen CO₂-Emissionen können durch eine sanierungszyklusbedingt noch nicht erfolgte Modernisierung der Gebäudehülle erklärt werden.

Insgesamt wird deutlich, dass eine drastische CO₂-Emissionsreduktion wie im Szenario *TP Primärenergie* nicht mit einer entsprechenden PM-Emissionsreduktion einhergeht. Im Szenario *TP NO_x* können dahingegen niedrige PM-Emissionen erreicht werden, die aber im Vergleich dazu mit höheren CO₂-Emissionen verbunden sind. Technische Lösungsansätze wären die weitere Reduktion der PM-Emissionen durch die Entwicklung effektiverer¹⁸⁹ Partikelabscheider bei Festbrennstofffeuerungen oder die weitere Reduktion der CO₂-Emissionen bei Gasfeuerungen durch eine Erhöhung des solaren Deckungsanteils bspw. durch Wechsel von der reinen Trinkwassererwärmung zur Raumheizungsunterstützung.

¹⁸⁹ Partikelabscheider sind in den Szenarien bereits berücksichtigt.

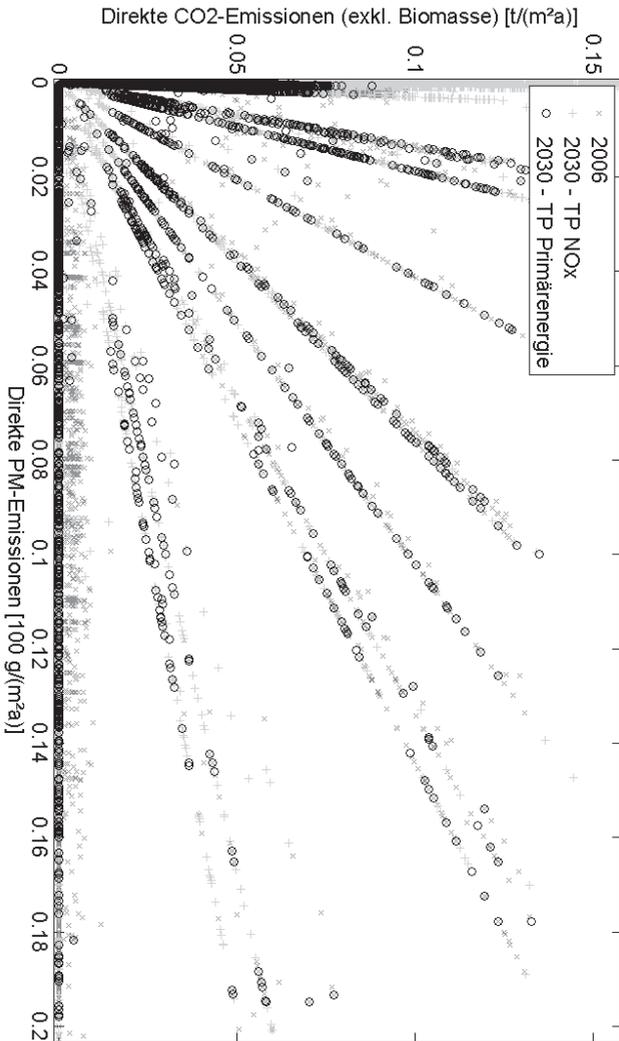


Abbildung 32: Streudiagramm zu Emissionen an CO₂ (exkl. Biomasse) und PM im Jahr 2006 sowie im Jahr 2030 gemäß den Szenarien TP NO_x und TP Primärenergie nicht erneuerbar (gestützte Abbildung)

7.3 Ökonomisches Potenzial

Dieser Abschnitt hat einen Bezug zu folgenden (Teil-)Forschungsfragen:

- Wie groß sind die *ökonomischen* Reduktionspotenziale für Treibhausgas- und Luftschadstoffemissionen sowie den Primärenergieverbrauch?
- Welche Bündel umweltpolitischer Instrumente sind für den Bereich Wärmenutzung in Wohngebäuden geeignet, um die Treibhausgas- und Luftschadstoffemissionen sowie den Primärenergieverbrauch zu reduzieren?

In Abschnitt 7.3.1 werden Szenarien definiert, die in Abschnitt 7.3.2 zur Bestimmung der aus Gebäudeeigentümer-/bewohnersicht ökonomischen¹⁹⁰ Reduktionspotenziale für Treibhausgas- und Luftschadstoffemissionen sowie den Primärenergieverbrauch herangezogen werden. Dabei wird zudem untersucht, wie sich diese Potenziale durch umweltpolitische Instrumente verändern. In Abschnitt 7.3.3 werden die Potenziale mittels Literaturdaten plausibilisiert. Zur Unterstützung der Ausschöpfung der ökonomischen Potenziale werden in Abschnitt 7.3.4 diesbezüglich geeignete Ausgestaltungen von Mindestanforderungspaketen spezifiziert. Für die aus gesellschaftlicher Sicht effiziente Unterstützung der Ausschöpfung von Potenzialen, die über die aus Gebäudeeigentümer-/bewohnersicht ökonomischen Potenziale hinausgehen, werden in Abschnitt 7.3.5 entsprechende Förderpaketausgestaltungen identifiziert.

7.3.1 Szenarien

Tabelle 114 fasst die Definition zwölf ökonomischer Potenzialszenarien zusammen, d. h. derjenigen Szenarien, die zur Bestimmung der ökonomischen Reduktionspotenziale für Treibhausgas- und Luftschadstoffemissionen sowie

¹⁹⁰ Das ökonomische Potenzial sei definiert als das Potenzial, das bei Entscheidung gemäß Kapitalwert aus Selbstnutzersicht bei den in *AWOHH* vorgegebenen technischen Möglichkeiten unter Beibehaltung der zeitlichen Kopplung von Modernisierungsmaßnahmen an die Sanierungszyklen von Gebäudehülle und Anlagentechnik resultiert. Es ist daher auch von umweltpolitischen Instrumenten abhängig.

den Primärenergieverbrauch eingesetzt werden. Die Definition erfolgt in Bezug auf die Basisszenarien (vgl. Tabelle 99 in Abschnitt 7.1), wobei nur von den Basisszenarien abweichende Szenarioelemente spezifiziert werden.

Die Szenarien *KW9* und *KW11* dienen der Identifizierung der Potenziale, die bei Entscheidung aller Gebäudeeigentümer gemäß dem Entscheidungsansatz *Max Kapitalwert – Selbstnutzersicht* ausgeschöpft würden. Dabei wird davon ausgegangen, dass vom Staat keine Investitionszuschüsse gewährt werden, keine steuerliche Absetzbarkeit energetischer Modernisierungsinvestitionen möglich ist und keine Variation der Energiesteuern erfolgt. Die beiden Szenarien unterscheiden sich in Hinsicht auf die Mindestanforderungen an Wärmeversorgungspakete und Gebäudehülle im Falle von Neubau und Sanierung (vgl. *H++W**¹⁹¹ und *H++++W***¹⁹² in Abschnitt 5.6.3), wobei die Sanierung der Gebäudehülle in beiden Szenarien umgangen werden kann. Die Ergebnisse in Abschnitt 7.3.2 zeigen, dass die beiden Szenarien zu ähnlichen Ergebnissen führen, weshalb die übrigen ökonomischen Potenzialszenarien das mit stark verringerten Modelllaufzeiten einhergehende Mindestanforderungspaket *H++++W*** umfassen.

Die Szenarien *KW11 \$\$*, *KW11 \$\$\$*, *KW11 Steuer*, *KW11 \$\$ Steuer*, *KW11 ##* und *KW11 ###* dienen der Identifizierung der Potenziale bei der Gewährung von Investitionszuschüssen und erhöhten Investitionszuschüssen, der steuerlichen Abzugsfähigkeit energetischer Modernisierungen bei selbstnutzenden Eigentümern, der Kombination aus Investitionszuschüssen und der steuerlichen Abzugsfähigkeit, erhöhten Energiesteuern sowie stark erhöhten Energiesteuern. Durch diese Szenarien wird implizit die Sichtweise des Staates bzw.

¹⁹¹ Das Mindestanforderungspaket ist angelehnt an die EnEV 2009.

¹⁹² Darunter sind um ca. 50% reduzierte Wärmedurchgangskoeffizienten im Vergleich zur EnEV 2009 bei der Sanierung, erhöhte Anforderungen an die Wärmeerzeuger (Verbot von Holzpelletkesseln ohne Partikelabscheider u. a. Wärmeerzeugern; vgl. Qualitätsstufen in Tabelle 131 in Anhang A.1) und erhöhte Anforderungen an den Neubau zu verstehen. Das Verbot von Holzpelletkesseln ohne Partikelabscheider betrifft allerdings in der Realität die 1. BImSchV und nicht die EnEV.

der Gesellschaft eingenommen. Dieser bzw. diese kann Interesse an der über die Szenarien *KW9* und *KW11* hinausgehenden Reduktion von Treibhausgas- und Luftschadstoffemissionen sowie dem Primärenergieverbrauch haben, da bspw. Schäden durch Luftschadstoffe und Treibhausgase vermieden werden. Um die entsprechenden Modernisierungspakete in der Simulation für die gemäß dem Entscheidungsansatz *Max Kapitalwert – Selbstnutzersicht* handelnden Gebäudeeigentümer optimal werden zu lassen, müssen allerdings entsprechende Förderprogramme, das Instrument der steuerlichen Absetzbarkeit oder Energiesteuern eingesetzt werden, sofern auf über die wirtschaftlichste Variante hinausgehende Mindestanforderungen verzichtet wird.

Da Förderungen und Steuererleichterungen bzw. -erhöhungen auch Mitnahmeeffekte implizieren, wird über das Szenario *Staatssicht 11* als Referenz aufgezeigt, welche Reduktionspotenziale existieren, falls die Gebäudeeigentümer gemäß dem Entscheidungsansatz *Techno-ökonomischer Kompromiss* entscheiden. Die zugehörigen Modernisierungspakete wären zwar nur bei individueller Förderung ohne Überförderung erreichbar, sind aber Ausgangspunkt für die Identifizierung vielversprechender Förderpakete, losgelöst von den aktuellen Förderstrukturen.

Die Szenarien *KW11 MA*, und *Staatssicht 11 MA* unterscheiden sich von den Szenarien *KW11* und *Staatssicht 11* durch die Deaktivierung der Module Neubau, Abbruch und Haushaltsdynamik. Durch diese Deaktivierung existieren in beiden Szenarien im Jahr 2030 dieselben Gebäude und Haushalte wie im Jahr 2006, sodass diese für die Ausgestaltung von Förderpaketen und die Zielgruppenadaption umweltpolitischer Instrumente in den Abschnitten 7.3.5 und 7.4.4 gegenübergestellt werden können, ohne dass zahlreiche Gebäude wegen der Zufallsziehungen wegfallen. Bei der Zielgruppenadaption umweltpolitischer Instrumente beziehen sich die Aussagen damit auch auf die Haushalte und Haushaltseigenschaften zum Startjahr der Simulation, d. h. die Zielgruppen, die in naher Zukunft durch die Instrumente erreicht werden müssen.

Tabelle 114: Definition der Szenarien zur Bestimmung der ökonomischen Potenziale (ökonomische Potenzialszenarien) durch Spezifikation der von den Basiszenarien abweichenden Szenarioelemente (Datengrundlage: Annahmen)

Kurzziel	Szenario name (KW: Kapitalwert, MA: Multivariate Analyse)	Entscheidungsansätze (alle Eigentümernstrukturen)	Umweltpolitische Instrumente Mindestanforderungen	Investitions-zuschüsse	Steuertliche Abzugsfähigkeit	Energie- steuern	Aktivierte Module	Sonstige unsichere Parameter Auf die Mieter umgelegter Anteil der Modernisierung [-]
01	KW9	Max Kapitalwert - Selbstnutz zersicht	H++AW*	\$	Nein	#	Alle aktiv	0,11
02	KW11	Max Kapitalwert - Selbstnutz zersicht	H+++AW**	\$	Nein	#		0,11
03	KW11 \$\$	Max Kapitalwert - Selbstnutz zersicht		\$\$	Nein	#		0,11
04	KW11 \$\$\$	Max Kapitalwert - Selbstnutz zersicht		\$\$\$	Nein	#		0,11
05	KW11 Steuer	Max Kapitalwert - Selbstnutz zersicht		\$	Ja	#		0,11
06	KW11 \$\$ Steuer	Max Kapitalwert - Selbstnutz zersicht		\$\$	Ja	#		0,11
07	KW11 ##	Max Kapitalwert - Selbstnutz zersicht		\$	Nein	##		0,11
08	KW11 ###	Max Kapitalwert - Selbstnutz zersicht		\$	Nein	###		0,11
09	Staatsicht 11	Techno-ökonomischer Kompromiss		\$	Nein	#		0,11
010	KW11 MA	Max Kapitalwert - Selbstnutz zersicht		\$	Nein	#	Neubau, Abbruch und Haustatadynamik deaktiviert	0,11
011	Staatsicht 11 MA	Techno-ökonomischer Kompromiss		\$	Nein	#		0,11
012	Staatsicht 11 MA reduzierte Umlage	Techno-ökonomischer Kompromiss		\$	Nein	#		0,055

Auch bei der Identifizierung „sozialer Brennpunkte“ in Abschnitt 7.4.5 wird das Szenario *Staatssicht 11 MA* eingesetzt, um die sozialen Auswirkungen mit Schwerpunkt auf der aktuellen Haushaltskonstellation zu betrachten. Das Szenario *Staatssicht MA reduzierte Umlage* wird zusätzlich verwendet, um die Auswirkung reduzierter Modernisierungsumlagen auf die Mieter zu analysieren.

7.3.2 Emissionsminderungs- und Energieeinsparpotenziale

Tabelle 115 fasst die Reduktionen der direkten¹⁹³ CO₂-, CH₄-, NO_x-, SO₂-, NMVOC- und PM-Emissionen sowie des End- und Primärenergieverbrauchs des Wohngebäudebestands in Deutschland für Raumwärme und Warmwasser von 2006 bis 2030 in den ökonomischen Potenzialszenarien zusammen.

Tabelle 115: Reduktionen der direkten verbrennungsbedingten CO₂-, CH₄-, NO_x-, SO₂-, NMVOC- und PM-Emissionen sowie des End- und Primärenergieverbrauchs des Wohngebäudebestands in Deutschland für Raumwärme und Warmwasser von 2006 bis 2030 in den ökonomischen Potenzialszenarien

Indikator	Reduktion bis 2030 in Bezug auf 2006 [%]										Gesamtindikator
	Emissionen							Energieverbrauch			
Szenario	CO ₂	CO ₂ (exkl. Biomasse)	CH ₄	NO _x	SO ₂	NMVOC	PM	End	Primär (nicht erm.)	Primär (gesamt)	
KW9	35	34	33	43	69	61	69	33	34	34	0,55
KW11	37	36	35	44	70	61	74	35	35	35	0,56
KW11 \$\$	39	38	33	48	73	62	74	37	37	37	0,52
KW11 \$\$\$	39	38	31	49	75	62	74	38	38	38	0,51
KW11 Steuer	38	37	35	46	72	62	74	36	36	37	0,53
KW11 \$\$ Steuer	39	38	32	49	75	62	74	37	37	38	0,50
KW11 ##	39	38	33	48	73	62	75	37	37	38	0,54
KW11 ###	39	38	31	49	76	63	75	38	38	38	0,52
Staatssicht 11	44	43	-14	71	82	66	75	37	37	37	0,57
Min	35	34	-14	43	69	61	69	33	34	34	0,50
Max	44	43	35	71	82	66	75	38	38	38	0,57

Die ökonomischen Reduktionspotenziale von 2006 bis 2030 liegen gemäß *KW9* und damit ohne Förderung bei 69% für PM-Emissionen, 69% für SO₂-Emissionen, 61% für NMVOC-Emissionen, 33% für CH₄-Emissionen, 43% für NO_x-Emissionen, 35% für CO₂-Emissionen inkl. Biomasse und 34% für CO₂-

¹⁹³ Vgl. Fußnote 187 und Abschnitt 8.2 bez. indirekter Emissionen. Diese werden in *AWOHM* nicht berücksichtigt.

Emissionen exkl. Biomasse sowie 33% bzw. 34% für den End- bzw. gesamten und nicht erneuerbaren Primärenergieverbrauch. Durch die Verschärfung der Mindestanforderungen für die Gebäudehülle auf die höchste Qualitätsstufe und für die Anlagentechnik auf die zweithöchste Qualitätsstufe verändern sich die Reduktionen gemäß *KW11* nur geringfügig. Dabei werden auch die Neubauanforderungen erhöht, sodass die Auswirkungen für Bestandsgebäude vernachlässigbar sind, da ein Teil der geringfügigen Änderungen den Neubauten zugeschrieben werden kann.

Die Ausnutzungsgrade der Reduktionen in Bezug zum Szenario *Technischer Kompromiss* sind mit Ausnahme derjenigen der CH₄-Emissionen¹⁹⁴ in Tabelle 116 dargestellt. Im Szenario *KW11* sind diese für die Emissionen an NO_x bzw. CO₂ exkl. Biomasse mit 59% bzw. 74% am niedrigsten sowie für PM-Emissionen mit 93% am höchsten. Bei den CO₂-Emissionen inkl. Biomasse, den SO₂- und NMVOC-Emissionen sowie dem End- und Primärenergieverbrauch liegen die Ausnutzungsgrade bei 75-86%. Insgesamt sind die ökonomischen Potenziale damit bereits ohne Förderung mit Ausnutzungsgraden von mindestens 59% (in Bezug auf das technische Potenzial) vielversprechend. Ein Vergleich der energetischen Vollsanierungsrate von 1,7% im Szenario *KW11* für das Jahr 2006 mit der im Energiekonzept der Bundesregierung genannten Sanierungsrate von 1% (Bundeskabinett 2010) verdeutlicht allerdings, dass dieses Potenzial nicht ausgenutzt wird. Daher bietet sich die Unterstützung der Ausschöpfung des ökonomischen Potenzials durch entsprechende Mindestanforderungspakete an, deren adäquate Ausgestaltung exemplarisch in Abschnitt 7.3.4 erläutert wird.

Ausgehend vom Szenario *KW11* lassen sich die Ausnutzungsgrade bzw. der stellvertretend ausgewählte Ausnutzungsgrad für CO₂-Emissionen von 75%

¹⁹⁴ Die Ausnutzungsgrade der CH₄-Emissionsreduktionen sind aufgrund negativer Emissionsreduktionen von -4% im Szenario *Technischer Kompromiss* nicht dargestellt. Unter den ökonomischen Potenzialszenarien führt nur das Szenario *Staats-sicht 11* mit -14% ebenfalls zu einer Erhöhung der CH₄-Emissionen. Die übrigen Szenarien führen zu einer Reduktion um mindestens 31%.

durch die steuerliche Abzugsfähigkeit energetischer Modernisierungen auf 78%, durch Investitionszuschüsse auf 79% sowie durch die Kombination von Investitionszuschüssen und der steuerlichen Abzugsfähigkeit oder durch erhöhte Investitionszuschüsse auf 80% steigern. Alternativ können auch durch die Erhöhung der Energiepreise um 25% bzw. 50% Ausnutzungsgrade von 79% und 80% erreicht werden. Diese Ausnutzungsgrade liegen jedoch alle unter dem Ausnutzungsgrad von 90% im Szenario *Staatsicht 11*, in dem alle Gebäudeeigentümer gemäß dem Entscheidungsansatz *Techno-ökonomischer Kompromiss* entscheiden.

Tabelle 116: Ausnutzungsgrad der Reduktionen der direkten verbrennungsbedingten CO₂-, NO_x-, SO₂-, NMVOC- und PM-Emissionen sowie des End- und Primärenergieverbrauchs des Wohngebäudebestands in Deutschland für Raumwärme und Warmwasser von 2006 bis 2030 in den ökonomischen Potenzialszenarien in Bezug auf das Szenario *Technischer Kompromiss*

Indikator	Ausnutzungsgrad des technischen Kompromisses bis 2030 [%]								
	Emissionen						Energieverbrauch		
Szenario	CO ₂	CO ₂ (exkl. Biomasse)	NO _x	SO ₂	NMVOC	PM	End	Primär (nicht em.)	Primär (gesamt)
KW9	72	71	58	82	85	87	81	78	80
KW11	75	74	59	82	86	93	86	81	84
KW11 \$\$	79	78	64	86	87	94	90	85	88
KW11 \$\$\$	80	79	66	88	87	94	91	87	89
KW11 Steuer	78	76	62	85	87	94	88	84	86
KW11 \$\$ Steuer	80	78	65	88	87	94	91	86	89
KW11 ##	79	78	64	86	87	94	91	86	89
KW11 ###	80	79	66	89	88	95	92	88	90
Staatsicht 11	90	89	96	97	92	95	90	85	88
Min	72	71	58	82	85	87	81	78	80
Max	90	89	96	97	92	95	92	88	90

Stellt man die Barwerte der Gesamtausgaben von Eigentümern und Mietern (zzgl. Förderung, abzüglich Restwert der Investitionen) für die Wärmeversorgung der Gebäude von 2006 bis 2030, wie in Tabelle 117 dargestellt, gegenüber, so zeigt sich, dass diese ausgehend von 734 Mrd. € im Szenario *KW11* über 736 Mrd. € in den Szenarien *KW11 \$\$* und *KW11 \$\$\$* auf 748 Mrd. € im Szenario *Staatsicht 11* ansteigen. Die Förderung bzw. der Entscheidungsansatz *Techno-ökonomischer Kompromiss* bewirken also, wie erwartet, ein Abweichen von den wirtschaftlich optimalen Maßnahmenpaketen des Szenarios

KW11. Im Gegenzug sinken die über 2006 bis 2030 gemittelten CO₂-Emissionen von 104,0 bis auf 98,0 Tg/a. Bewirkt wird die Abweichung vom Szenario *KW11* im Szenario *KW11 \$\$* bzw. *KW11 \$\$\$* durch Förderausgaben mit einem Barwert von 23 bzw. 35 Mrd. €. Diese stehen allerdings einer Barwerterhöhung von jeweils nur 2 Mrd. € gegenüber, sodass von einer beträchtlichen Überförderung ausgegangen werden kann. Im Szenario *Staatssicht 11* wird dahingegen simuliert, dass alle Gebäudeeigentümer von sich aus gemäß dem Entscheidungsansatz *Techno-ökonomischer Kompromiss* entscheiden. Ginge man von einer individuellen Förderung in Höhe der Kapitalwertverschlechterung aus Selbstnutzersicht aus, so wären die Maßnahmenpakete des Szenarios *Staatssicht 11* ab Förderausgaben mit einem Barwert von ca. 14 Mrd. € erreichbar.

Tabelle 117: Barwerte der Ausgaben für die Wärmeversorgung der Gebäude und der Förderausgaben, mittlere CO₂-Emissionen sowie mittlere Förderausgaben pro vermiedenen CO₂-Emissionen für ausgewählte Szenarien jeweils für 2006 bis 2030

Szenario	Barwert der Ausgaben (zzgl. Förderung, abzüglich Restwert) abgezinst auf 2005 [Mrd. €]				Barwert der Förderausgaben abgezinst auf 2005 [Mrd. €]	Mittlere CO ₂ -Emissionen von 2006 bis 2030 [Tg/a]	Mittlere Förderausgaben pro vermiedenen CO ₂ -Emissionen [€/t]
	Professionelle oder institutionelle Vermieter und Mieter	Amateurvermieter und Mieter	Selbstnutzende Eigentümer	Summe			
KW11	161	224	349	734	-	104,0	-
KW11 \$\$	161	225	349	736	23	102,3	330
KW11 \$\$\$	161	225	349	736	35	101,8	400
Staatssicht 11	164	229	355	748	(14) ¹⁹⁵	98,0	57
KW11 Steuer	161	225	350	736	21	102,9	479
KW11 ##	187	261	409	857	-	102,3	-
KW11 ###	213	296	470	980	-	102,0	-

Als mittlere Förderausgaben pro vermiedenen CO₂-Emissionen im Vergleich zum Szenario *KW11* ergeben sich bei einem für die Maßnahmen angenommenen Wirkungshorizont von 40 Jahren¹⁹⁶ in den Szenarien *KW11 \$\$* und *KW11 \$\$\$*

¹⁹⁵ Die hier angegebene Differenz der Barwerte der Ausgaben (zzgl. Förderung, abzüglich Restwert) in den Szenarien *Staatssicht 11* und *KW11* entspricht bei einem Zinssatz von 5%, einem jährlichen Energiepreisanstieg von 3% und linearer Abnutzung der Investition zur Restwertschätzung nicht exakt der Summe der Kapitalwertverschlechterungen aus Selbstnutzersicht.

¹⁹⁶ Der angenommene Wirkungshorizont entspricht der in *AWOHM* angesetzten Lebensdauer von Hüllenpaketen (vgl. Tabelle 99). Bei geförderten Wärmeerzeu-

\$\$\$330 und 400 €/t. Diese stehen im Szenario *Staatssicht 11* bei der Annahme individueller Förderung ca. 57 €/t bei höherer CO₂-Vermeidung gegenüber. Dies verdeutlicht die Existenz eines Potenzials für eine verbesserte Ausgestaltung der Förderstruktur, die im Vergleich zu den Szenarien *KW11 \$\$* und *KW11 \$\$\$* einen höheren Ausnutzungsgrad und niedrigere mittlere Förderausgaben pro vermiedenen CO₂-Emissionen aufweist. Entsprechende Vorschläge für Förderpaketausgestaltungen mit geringerer Überförderung werden exemplarisch in Abschnitt 7.3.5 identifiziert. Beim Übergang vom Szenario *KW11* zum Szenario *Staatssicht 11* können u. a. auch die Ausnutzungsgrade für NO_x- und SO₂-Emissionen von 59% auf 96% bzw. von 82% auf 97% gesteigert werden.

Im Szenario *KW11 Steuer* verursacht die steuerliche Absetzbarkeit energetischer Modernisierungen Steuermindereinnahmen bzw. Förderausgaben von 21 Mrd. €, obwohl der Barwert der Gesamtausgaben (zzgl. Förderung, abzüglich Restwert der Investitionen) sich im Vergleich zum Szenario *KW11* nur um 2 Mrd. € erhöht. Dabei wird angenommen, dass alle Gebäudeeigentümer und somit auch die Vermieter aus Selbstnutzersicht entscheiden. Der Effekt der steuerlichen Absetzbarkeit energetischer Modernisierungen bei selbstnutzenden Eigentümern wird daher überschätzt. Doch selbst in diesem Falle führt dieses Instrument im Vergleich zum Szenario *KW11 \$\$* zu einer niedrigeren CO₂-Vermeidung und höheren mittleren Förderausgaben pro CO₂-Vermeidung.

Die Erhöhung der Energiepreise um 25% (*KW11 ##*) bzw. 50% (*KW11 ###*) ermöglicht zwar eine Reduktion der mittleren CO₂-Emissionen auf 102,3 bzw. 102,0 Tg/a. Bei einer derartig beträchtlichen Erhöhung stiege allerdings der Barwert der Gesamtausgaben von Eigentümern und Mietern (abzüglich Restwert) für die Wärmeversorgung der Gebäude von 2006 bis 2030 auf 857 bzw. 980 Mrd. € und damit um 17% bzw. 34% im Vergleich zum Szenario *KW11*. Die Mehrbelastung fiel in letzterem Falle zwar bei Selbstnutzern mit 35% hö-

gern wird implizit davon ausgegangen, dass nach Ablauf ihrer Lebensdauer ohne erneute Förderung wieder derselbe Wärmeerzeugertyp eingebaut wird.

her aus als bei den Mietern mit Amateurvermietern und den Mietern mit professionellen und institutionellen Vermietern (beide 32%). Dennoch würden alle und damit auch einkommensschwache Haushalte finanziell belastet, sodass der Einsatz kompensierender Transferleistungen notwendig erscheint. Da Letztere kein Betrachtungsgegenstand dieser Arbeit sind, wird die erhöhte Besteuerung von Energieträgern nicht detailliert analysiert.

Erweitert man die Analyse von den CO₂-Emissionen und der ökonomischen Betrachtung auf den in Tabelle 115 angegebenen nachhaltigkeitsorientierten Gesamtnutzen aus Staatssicht¹⁹⁷, so zeigt sich unter den ökonomischen Potenzialszenarien das Maximum für das Szenario *Staatssicht 11*, gefolgt von *KW11*, *KW9* und *KW11 ##*. Eine Ausrichtung von Mindestanforderungspaketen am Szenario *KW11* und von Förderpaketen am Szenario *Staatssicht 11* wird daher ebenfalls durch die Bewertung aus Staatssicht gestützt.

7.3.3 Plausibilisierung

Höhe der energetischen Sanierungsraten

In den Szenarien *KW11* und *KW11 \$\$* liegt die energetische Sanierungsrate der Anlagentechnik für das Jahr 2007 bei 3,1%. Diefenbach u. a. (2010) nennen eine ähnliche jährliche Modernisierungsrate für die Wärmeerzeuger von 2,8% für 2005-2009. Da in *AWOHM* in jedem Szenario vom Austausch der Anlagentechnik nach Ablauf der technischen Lebensdauer ausgegangen wird, ist diese Sanierungsrate nicht auf die betrachteten Szenarien beschränkt. Die energetische Sanierungsrate der Gebäudehülle, die in *AWOHM* zwischen den Szenarien variiert, liegt in den Szenarien *KW11* und *KW11 \$\$* für das Jahr 2007 bei 1,7% bzw. 1,9%, wobei im Szenario *KW11 \$\$* auch die Sanierungsraten für Wände, oberen und unteren Gebäudeabschluss sowie Fenster jeweils bei 1,9% liegen. Durch die Förderung kann dabei ausgehend von Szenario *KW11* (in der ersten Nachkommastelle) nur die Sanierungsrate der Fenster von 1,1% auf 1,9% er-

¹⁹⁷ Eine detaillierte Diskussion der Bewertung aus Staatssicht erfolgt in Abschnitt 7.5.

höht werden, sodass von Mitnahmeeffekten ausgegangen werden kann. Diefenbach u. a. (2010) nennen für die Jahre 2005 bis 2008/2009 energetische Modernisierungsraten von 0,65% für die Außenwand, 1,20% für Dach bzw. oberste Geschossdecke, 0,25% für Fußboden bzw. Kellerdecke und 1,34% für Fenster. Mit Ausnahme der Anlagentechnik und der Fenster im Szenario *KW11*, liegen in *AWOHM* die den ökonomischen Potenzialen entsprechenden Sanierungsraten für alle Bauteile über den tatsächlichen Sanierungsraten, was durch die Nichtausnutzung ökonomischer Potenziale begründet werden kann. Diese Nichtausnutzung ist bei Fußböden und Kellerdecken gefolgt von den Außenwänden am stärksten ausgeprägt.

Jährliche Investitionen und Fördervolumina

Die Investitionen in den Wohngebäudebestand belaufen sich in *AWOHM* im Szenario *KW11* für das Jahr 2007 auf 16,3 Mrd. € (brutto), davon sind 4,1 Mrd. € für die energetische Modernisierung der Wände, 0,9 Mrd. € für den oberen Gebäudeabschluss, 0,6 Mrd. € für den unteren Gebäudeabschluss, 1,2 Mrd. € für die energetische Modernisierung der Fenster (energiebedingte Mehrinvestition) und 9,5 Mrd. € für die Wärmeversorgungspakete (davon 5,1 Mrd. € für die Wärmeerzeuger). Das Gesamtvolumen des Modernisierungsmarktes für Wohngebäude betrug im Jahr 2004 2 Mrd. € für Wärmedämmung und 8 Mrd. € für die Anlagentechnik (Heinze GmbH 2005). In Hinsicht auf die Gebäudehülle kann die Überschätzung in *AWOHM* analog zur Sanierungsrate durch die Nichtausnutzung der ökonomischen Potenziale erklärt werden.

Die Finanzmittel des Bundes für das CO₂-Gebäudesanierungsprogramm lagen im Jahr 2007 bei 0,85 Mrd. € und für das nicht auf Wohngebäude beschränkte Marktanreizprogramm „Erneuerbare Energien“ bei ca. 0,2 Mrd. € (Matthes u. a. 2009). Im Szenario *KW11* betragen die Förderausgaben im Jahr 2007 1,1 Mrd. € für die Gebäudehülle und 0,4 Mrd. € für die Anlagentechnik. Da das CO₂-Gebäudesanierungsprogramm nicht auf die Gebäudehülle beschränkt war und von einer Nichtausnutzung der ökonomischen Potenziale ausgegangen werden kann, sind diese Werte plausibel.

In den Szenarien *KW9* bzw. *KW11* lagen die Investitionen in den Neubau bei 14 bzw. 24 Mrd. € (brutto, Kostengruppen 330 bis 360 und 420 nach DIN 276 (1993)) für das Jahr 2007. Die Unterschiede zwischen den Szenarien sind auf die unterschiedlichen Ausstattungsstandards, die unterstellt werden, zurückzuführen. Die Investitionen in neue Wohngebäude beliefen sich im Jahr 2007 gemäß dem statistischen Bundesamt auf 27 Mrd. € (Statistisches Bundesamt 2011). Diese übersteigen die mit *AWOHM* berechneten Investitionen, obwohl die Anzahl der Neubauten diejenige der Raumordnungsprognose (vgl. BBSR 2006), die auch in *AWOHM* verwendet wurde, um ca. 25% unterschreitet. Während die Abweichung der Neubauanzahl durch Finanzkrise und Wegfall der Eigenheimzulage erklärt werden kann, ist die Unterschätzung der Investitionen in *AWOHM* ggf. auf die Wahl der Systemgrenzen und die entsprechende Beschränkung der betrachteten Kostengruppen zurückzuführen.

7.3.4 Ausgestaltung von Mindestanforderungspaketen

In diesem Abschnitt sollen gemäß dem in Abschnitt 6.2.2 beschriebenen Ansatz Mindestanforderungen für die Sanierung des Gebäudebestands identifiziert werden. Dies erfolgt unter der Annahme, dass die Mindestanforderungen die Umsetzung der im Szenario *KW11* gewählten Kombinationen aus Maßnahmen an Gebäudehüllen und Wärmeversorgungspaketen unterstützen sollen.

Werden für alle Gebäude, die sowohl im Startjahr 2006 als auch im Endjahr 2030 der Simulation im Modell existieren, basierend auf den in Tabelle 92 angegebenen Variablen sukzessive Clusteranalysen für eine steigende Clusteranzahl durchgeführt, so sinkt das verwendete Heterogenitätsmaß, die Summe der Fehlerquadratsummen innerhalb der Cluster, sukzessive (vgl. Abbildung 33). Gemäß dem Ellbogenkriterium (vgl. Backhaus u. a. 2003) kann eine Clusteranzahl von zehn ausgewählt werden, wobei diese Wahl einen subjektiven Charakter besitzt. Diese Clusteranzahl entspricht einem Kompromiss aus einem möglichst niedrigen Heterogenitätsmaß und einer möglichst niedrigen Clusteranzahl. Je kleiner das Heterogenitätsmaß ist, desto präziser können

Gebäudeeigenschaften vor und nach der Sanierung spezifiziert werden und somit aus Staatssicht im Sinne des Szenarios *KW11* als Mindestanforderungen gesetzt werden. Je kleiner die Clusteranzahl ist, desto überschaubarer ist die Anzahl der zu formulierenden Mindestanforderungspakete, sodass diese eher in der Realität zum Einsatz kommen könnten.¹⁹⁸

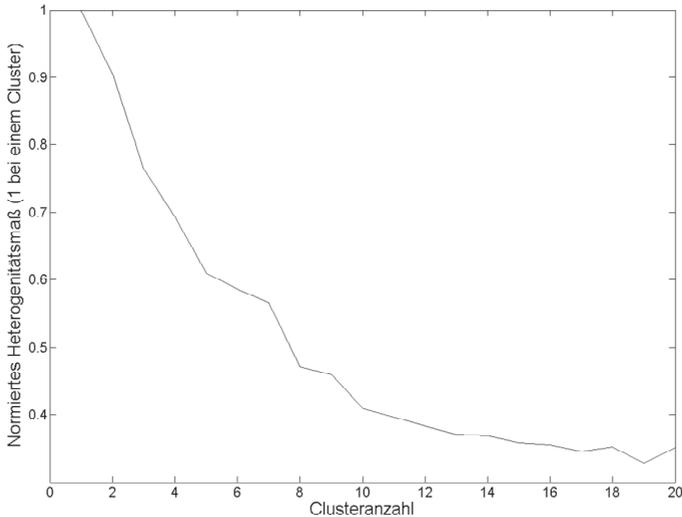


Abbildung 33: Normiertes Heterogenitätsmaß (Summe der Fehlerquadratsummen innerhalb von Clustern) in Abhängigkeit von der Clusteranzahl bei der Ausgestaltung von Mindestanforderungspaketen

Die sich bei einer Clusteranzahl von zehn ergebenden Cluster beinhalten zwischen 3% und 20% der Gebäude. Die folgende Analyse und Interpretation beschränkt sich auf zwei exemplarische Cluster A und B. Bei den verbleibenden

¹⁹⁸ Die abgeleiteten Ergebnisse waren trotz des nicht-deterministischen Fusionsalgorithmus strukturell reproduzierbar und die Cluster inhaltlich interpretierbar. Da somit aus anwendungsorientierter Sicht verwertbare Ergebnisse resultierten, wurde auf weitere Stabilitäts- und Validitätsprüfungen verzichtet.

Clustern kann analog vorgegangen werden. Tabelle 118 zeigt die Variablenmittelwerte der Cluster A und B. Im Vergleich zu Cluster B umfasst Cluster A kleinere Gebäude älteren Baujahrs, die vor der (etwaigen)¹⁹⁹ Sanierung höhere Wärmedurchgangskoeffizienten der Gebäudehülle aufweisen.

Tabelle 118: Variablenmittelwerte von Clustern mit 18% und 7% Anteil an allen Objekten bei der Clusteranalyse zur Ausgestaltung von Mindestanforderungen bei einer Clusteranzahl von zehn; ET: Energieträger

Variablen		Cluster mit 18% Anteil (A)	Cluster mit 7% Anteil (B)	
Gebäudeeigenschaften	Basiseigenschaften	Anzahl Wohneinheiten [Wohneinheiten]	1,7	2,6
		Baujahr [a]	1947	1965
	Wärmedurchgangskoeffizienten (vor Sanierung)	Ob. Gebäudeabschluss [W/(m ² K)]	0,82	0,67
		Wand [W/(m ² K)]	1,29	0,99
		Fenster [W/(m ² K)]	2,81	2,24
		Unt. Gebäudeabschluss [W/(m ² K)]	1,01	0,89
	Wärmeversorgungspaket für Raumwärme und Warmwasser (vor Sanierung)	Anteil Fernwärme	0,00	0,96
		Anteil Gas	0,97	0,02
		Anteil Heizöl	0,01	0,00
		Anteil Holz	0,01	0,00
		Anteil sonstige fossile ET	0,01	0,02
		Anteil sonstige erneuerb. ET	0,00	0,00
		Effizienz Hauptwärmeerzeuger für Raumwärme	0,91	0,90
Maßnahmeneigenschaften	Wärmedurchgangskoeffizienten (nach Sanierung)	Ob. Gebäudeabschluss [W/(m ² K)]	0,12	0,33
		Wand [W/(m ² K)]	0,17	0,54
		Fenster [W/(m ² K)]	1,17	1,37
		Unt. Gebäudeabschluss [W/(m ² K)]	0,15	0,48
	Wärmeversorgungspaket für Raumwärme und Warmwasser (nach Sanierung)	Anteil Fernwärme	0,00	0,99
		Anteil Gas	1,00	0,00
		Anteil Heizöl	0,00	0,00
		Anteil Holz	0,00	0,00
		Anteil sonstige fossile ET	0,00	0,01
		Anteil sonstige erneuerb. ET	0,00	0,00
		Effizienz Hauptwärmeerzeuger für Raumwärme	0,92	0,94

Durch die Sanierung wurden die mittleren Wärmedurchgangskoeffizienten von oberem Gebäudeabschluss, Wand, Fenster und unterem Gebäudeabschluss bei Cluster A um 85%, 87%, 58% und 85% sowie bei Cluster B um 50%, 45%, 39% und 46% gesenkt. Die Wärmebereitstellung (Raumwärme und Warmwasser) in Cluster A erfolgte vor der Sanierung zu 97% (Endenergieanteil)

¹⁹⁹ Weder alle Gebäudehüllen noch alle Wärmeerzeuger stehen in der Periode von 2006 bis 2030 zur Sanierung bzw. zum Austausch an.

durch Gas und jeweils zu 1% durch Heizöl, Holz und sonstige fossile Energieträger bei einer mittleren Effizienz der Wärmeerzeuger von 91%. Durch die Sanierung wurde der Anteil des Energieträgers Gas auf 100% erhöht und die mittlere Effizienz auf 92% gesteigert. Die Wärmebereitstellung in Cluster B wurde durch den Wechsel der Wärmeerzeugerpakete von 96% Fernwärme, 2% Gas und 2% Elektrizität (sonstige fossile Energieträger) auf 99% Fernwärme und 1% sonstige fossile Energieträger verändert. Dabei wurde die mittlere Effizienz der Wärmeerzeuger von 90% auf 94% angehoben.

Da die Mittelwerte für die Spezifikation von Mindestanforderungspaketen nicht hinreichend sind, werden die beiden exemplarischen Cluster A und B näher analysiert, damit zu diesen konkrete Mindestanforderungen spezifiziert werden können.

Anzahl Wohneinheiten

Cluster A umfasst zu 74% Gebäude mit 1-2 Wohneinheiten und damit überwiegend Reihen- und Einfamilienhäuser. Cluster B umfasst zu 78% Gebäude mit mindestens 3 Wohneinheiten und somit MFH, GMH und HH bzw. die entsprechenden Sonderbauten in den neuen Bundesländern.

Baujahr

Cluster A umfasst zu 45%, 35% und 19% Gebäude der Baualtersklassen 1967-1990, 1927-1950 und 1887-1910 (vgl. Abbildung 34). Bei Sanierungszyklen von 40 Jahren für die Gebäudehülle und 20 Jahren für die Wärmeerzeuger umfasst der Cluster damit zu (mindestens) 99% Gebäude, bei denen während des betrachteten Zeitraums von 2006 bis 2030 sowohl eine Sanierung der Gebäudehülle als auch ein Austausch der Wärmeerzeuger ansteht. Cluster B umfasst dahingegen nur zu 41%, 11% und 4%, d. h. insgesamt zu 56%, Gebäude dieser Baualtersklassen. Die verbleibenden 44% verteilen sich mit 13%, 28% und 3% auf die Baualtersklassen 1991-2006, 1951-1966 und 1911-1926, bei denen im

Betrachtungszeitraum nur bzw. höchstens²⁰⁰ ein Austausch der Wärmeerzeuger ansteht.

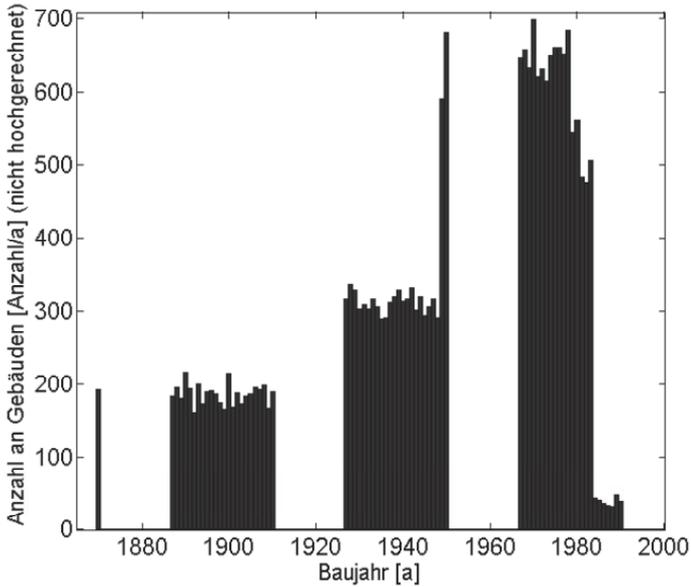


Abbildung 34: Häufigkeiten (ohne Hochrechnung) der zu Cluster A gehörenden Gebäude in Abhängigkeit vom Baujahr bei der Clusteranalyse zur Identifizierung von Mindestanforderungen bei einer Clusteranzahl von zehn

Wärmedurchgangskoeffizienten des unteren Gebäudeabschlusses

In Cluster A wird bei 100% der Gebäude der untere Gebäudeabschluss energetisch modernisiert. Gemäß Abbildung 35 weisen diese Gebäude vor der Sanierung Wärmedurchgangskoeffizienten des unteren Gebäudeabschlusses von über $0,5 \text{ W}/(\text{m}^2 \text{ K})$ auf. Nach der Sanierung erreichen sie Wärmedurchgangs-

²⁰⁰ Bei einigen Festbrennstofffeuerungen wurden Lebensdauern von 40 Jahren angesetzt, sodass nicht alle Wärmeerzeuger in der Periode von 2006 bis 2030 ausgetauscht werden müssen. Diese sind mengenmäßig aber von untergeordneter Bedeutung.

koeffizienten von $0,15 \text{ W}/(\text{m}^2 \text{ K})$. Analoges gilt für Cluster B, in dem bei 53% aller Gebäude der untere Gebäudeabschluss energetisch modernisiert wird. Dieser Anteil entspricht ebenfalls in etwa allen Gebäuden, bei denen eine Sanierung der Gebäudehülle ansteht (56%), sodass die Abweichungen überwiegend auf die unterschiedlichen Baujahre zurückgeführt werden können.

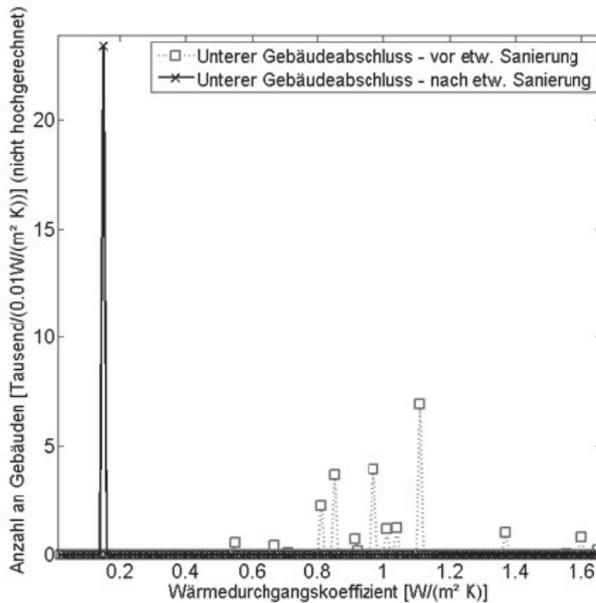


Abbildung 35: Häufigkeiten (ohne Hochrechnung) der zu Cluster A gehörenden Gebäude in Abhängigkeit vom Wärmedurchgangskoeffizienten des unteren Gebäudeabschlusses vor und nach einer etwaigen Sanierung bei einer Clusteranzahl von zehn

Wärmedurchgangskoeffizienten des oberen Gebäudeabschlusses

In Cluster A wird bei 99% der Gebäude der obere Gebäudeabschluss energetisch modernisiert, wobei bei 100% eine Sanierung der Gebäudehülle ansteht. Gemäß Abbildung 36 verschieben sich die Wärmedurchgangskoeffizienten der oberen Gebäudeabschlüsse für Cluster A überwiegend von Werten von mindestens $0,3 \text{ W}/(\text{m}^2 \text{ K})$ zu einem Wert von $0,12 \text{ W}/(\text{m}^2 \text{ K})$. Gebäude mit einem

Wärmedurchgangskoeffizienten zwischen 0,3 und 0,35 W/(m² K) durchlaufen zwar auch großteils eine Veränderung der Wärmedurchgangskoeffizienten. Ein marginaler Teil dieser Gebäude wird jedoch nicht energetisch modernisiert, sodass bei diesen Gebäuden (unter den getroffenen Annahmen) die Grenze der „wirtschaftlichen Vertretbarkeit“ erreicht worden sein könnte und somit die niedrigere Sanierungsrate des oberen Gebäudeabschlusses im Vergleich zum unteren Gebäudeabschluss erklärt wird. Eine analoge Argumentation gilt für die Gebäude von Cluster B, bei denen in 49% der Fälle eine energetische Modernisierung des oberen Gebäudeabschlusses erfolgt, wobei 56% der Gebäudehüllen zur Sanierung anstehen.

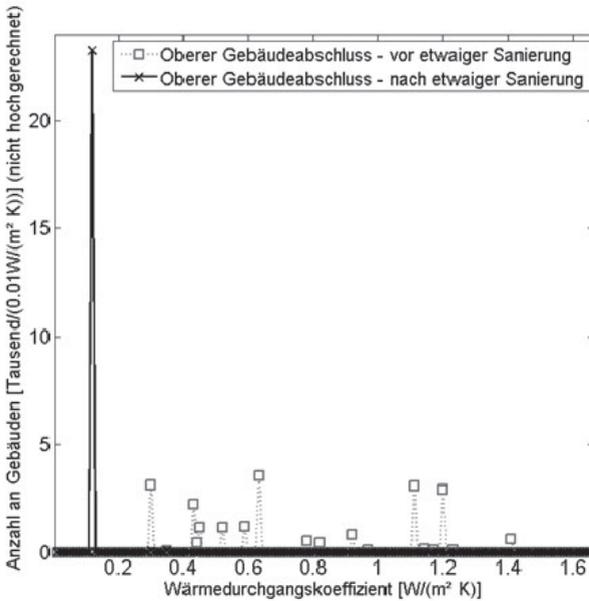


Abbildung 36: Häufigkeiten (ohne Hochrechnung) der zu Cluster A gehörenden Gebäude in Abhängigkeit vom Wärmedurchgangskoeffizienten des oberen Gebäudeabschlusses vor und nach einer etwaigen Sanierung bei einer Clusteranzahl von zehn

Wärmedurchgangskoeffizienten der Wände

In Cluster A werden nur bei 92% der Gebäude die Wände energetisch modernisiert, obwohl 100% der Gebäude den Sanierungszyklus der Gebäudehülle erreicht haben. Gemäß Abbildung 37 erreichen Gebäude aus Cluster A, bei denen die Wand energetisch saniert wird, einen Wärmedurchgangskoeffizienten von $0,12 \text{ W}/(\text{m}^2 \text{ K})$.

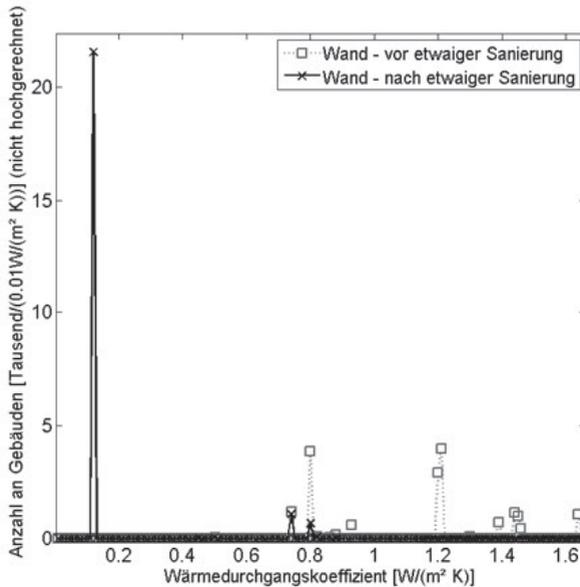


Abbildung 37: Häufigkeiten (ohne Hochrechnung) der zu Cluster A gehörenden Gebäude in Abhängigkeit vom Wärmedurchgangskoeffizienten der Wände vor und nach einer etwaigen Sanierung bei einer Clusteranzahl von zehn

Vor der Sanierung hatten diese Gebäude einen Wärmedurchgangskoeffizienten von mindestens $0,8 \text{ W}/(\text{m}^2 \text{ K})$. Analog zu den Ausführungen beim oberen Gebäudeabschluss könnte bei einem Wärmedurchgangskoeffizienten von $0,8 \text{ W}/(\text{m}^2 \text{ K})$ die Grenze der „wirtschaftlichen Vertretbarkeit“ erreicht werden. Aufgrund höherer energiebedingter Mehrinvestitionen bei der Außendämmung im Vergleich zur Dämmung des oberen Gebäudeabschlusses liegt dieser

Wärmedurchgangskoeffizient über den entsprechenden bei der Dämmung des oberen Gebäudeabschlusses. In Cluster B werden die Wände bei 47% aller Gebäude energetisch modernisiert. In der Relation zu den zur Sanierung anstehenden Gebäudehüllen (56%) ist die Sanierungsrate bei Cluster B im Gegensatz zu Cluster A für Wände demnach deutlich niedriger. Die Grenze der „wirtschaftlichen Vertretbarkeit“ liegt bei Cluster B zwischen 0,5 und 0,75 W/(m² K) und damit niedriger als bei Cluster A. Dies kann auf Unterschiede in den Energieträgerpreisen zwischen den Wärmeversorgungspaketen und zwischen den Sanierungszeitpunkten zurückgeführt werden.

Wärmedurchgangskoeffizienten der Fenster

In Cluster A werden bei 68% der Gebäude die Fenster energetisch modernisiert. Im Falle der energetischen Modernisierung wird ein Wärmedurchgangskoeffizient von 0,7 W/(m² K) erreicht (vgl. Abbildung 37). Ersetzt werden dabei überwiegend Fenster mit Wärmedurchgangskoeffizienten von mindestens 2,57 W/(m² K). Da jedoch nicht alle Gebäude mit diesem Wärmedurchgangskoeffizienten energetisch modernisiert werden, könnte bei diesem die Grenze der „wirtschaftlichen Vertretbarkeit“ liegen. Da ein Fenstertausch im Gegensatz zu einer Modernisierung der übrigen Gebäudehüllenkomponenten jedoch typischerweise mit einer energetischen Modernisierung verbunden ist, ist die Interpretation der Unterlassungsalternative problematisch. Analoges gilt für Cluster B, für den bei 38% der Gebäude die Fenster energetisch modernisiert werden. In diesem Cluster werden allerdings auch teilweise Fenster mit Wärmedurchgangskoeffizienten zwischen 1 und 2 W/(m² K) erneuert. Dies kann wiederum durch Unterschiede in den Energieträgerpreisen zwischen den Wärmeversorgungspaketen und zwischen den Sanierungszeitpunkten erklärt werden.

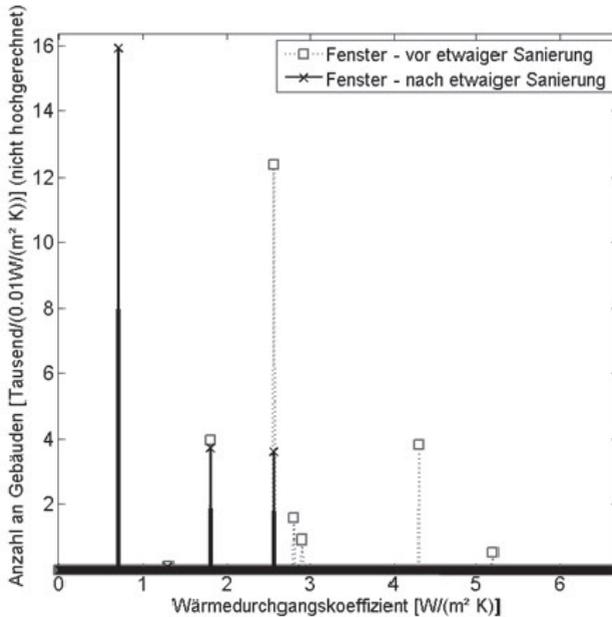


Abbildung 38: Häufigkeiten (ohne Hochrechnung) der zu Cluster A gehörenden Gebäude in Abhängigkeit vom Wärmedurchgangskoeffizienten der Fenster vor und nach einer etwaigen Sanierung bei einer Clusteranzahl von zehn

Energieträgeranteile bei der Wärmebereitstellung

Cluster A umfasst gemäß Abbildung 39 überwiegend Gebäude, deren Wärmeversorgung vor der (etwaigen)²⁰¹ Sanierung zu 100% auf Gas basiert. Es existieren allerdings auch Gebäude, deren mit zwischen 68% und 100% überwiegend auf Gas basierende Wärmeversorgung durch bis zu 32% sonstige fossile Energieträger – vor allem Elektrizität zur Warmwasserbereitung – ergänzt

²⁰¹ Vgl. Fußnote 200.

wird.²⁰² Durch den Austausch der Wärmeerzeuger erhöht sich der Anteil rein gasbasierter Wärmebereitstellung.

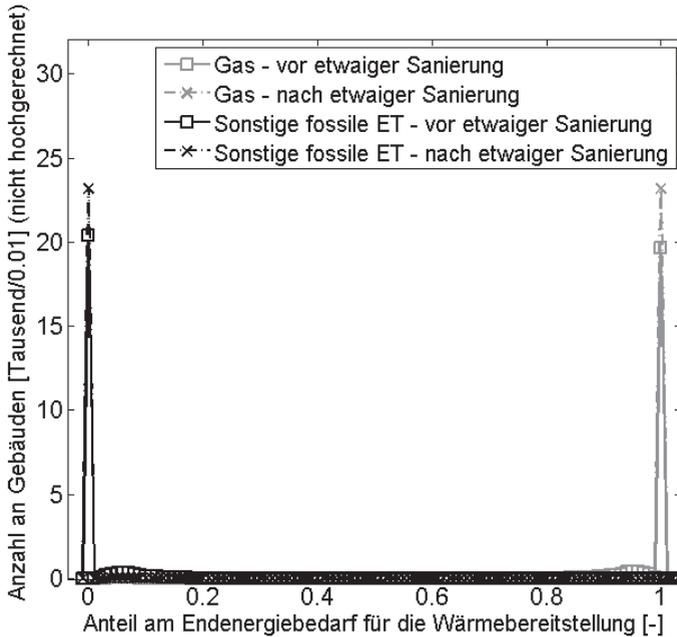


Abbildung 39: Häufigkeiten (ohne Hochrechnung) der zu Cluster A gehörenden Gebäude in Abhängigkeit vom Anteil von Gas und sonstigen fossilen Energieträgern am Endenergiebedarf vor und nach einer etwaigen Sanierung bei einer Clusteranzahl von zehn; ET: Energieträger

Cluster B umfasst gemäß Abbildung 40 überwiegend Gebäude, deren Wärmeversorgung vor der (etwaigen)²⁰³ Sanierung zu 100% auf Fernwärme basiert. Er beinhaltet aber auch Gebäude, deren überwiegend fernwärmebasierte Wärmeversorgung durch eine gasbasierte oder elektrizitätsbasierte Warm-

²⁰² Auf die Darstellung der Anteile von Heizöl und Holz (vgl. Tabelle 118) wurde zugunsten der Übersichtlichkeit verzichtet. Diese gleichen in Cluster A strukturell den Anteilen der sonstigen fossilen Energieträger.

²⁰³ Vgl. Fußnote 200.

wasserbereitung ergänzt wird. Durch den Austausch der Wärmeerzeuger erhöht sich der Anteil rein fernwärmebasierter Wärmeversorgungspakete.

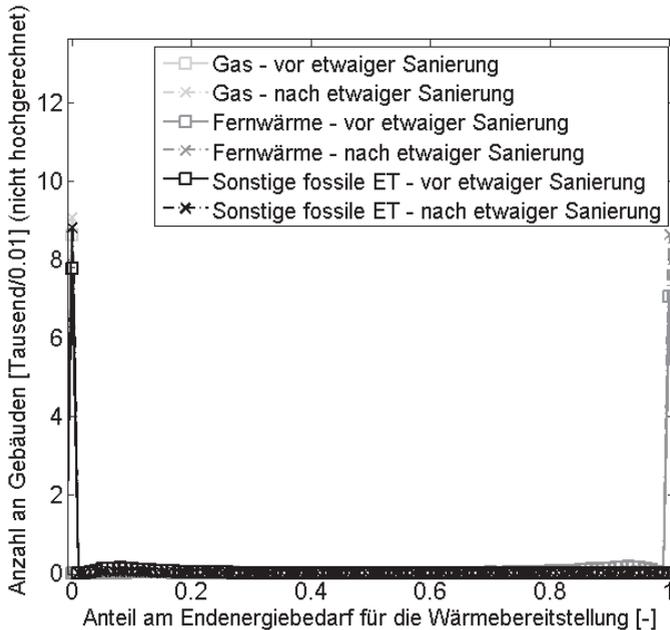


Abbildung 40: Häufigkeiten (ohne Hochrechnung) der zu Cluster B gehörenden Gebäude in Abhängigkeit vom Anteil von Gas, Fernwärme und sonstigen fossilen Energieträgern am Endenergiebedarf vor und nach einer etwaigen Sanierung bei einer Clusteranzahl von zehn; ET: Energieträger

Mittlere Effizienz der Wärmeerzeuger

Die mittlere Effizienz der Wärmeerzeuger, d. h. der Mittelwert der Jahresnutzungsgrade der Wärmeerzeuger der Wärmeversorgungspakete, liegt gemäß Abbildung 41 in Cluster A vor der (etwaigen)²⁰⁴ Sanierung überwiegend bei

²⁰⁴ Vgl. Fußnote 200.

91%²⁰⁵ (Modalwert), wobei u. a. auch Werte von 86%, 93%, 95% und 100% auftreten. Der Modalwert entspricht dabei dem angesetzten Jahresnutzungsgrad von Gaskesseln mit und ohne Gebläse. Durch den Austausch der Wärmeversorgungspakete erhöhen sich die Anteile der Effizienzen von 91% (weiterhin Modalwert) und 100%. Diese entsprechen den Jahresnutzungsgraden von Niedertemperaturkesseln und Brennwertkesseln. Der Niedertemperaturkessel wird dabei deutlich häufiger verbaut als der Brennwertkessel.

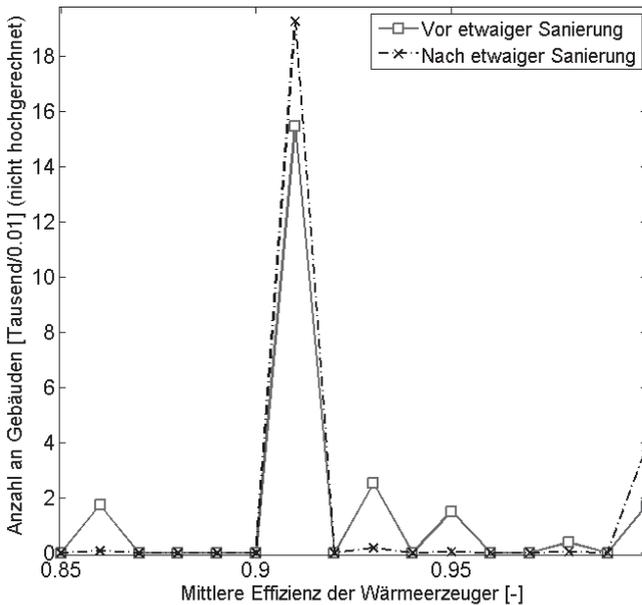


Abbildung 41: Häufigkeiten (ohne Hochrechnung) der zu Cluster A gehörenden Gebäude in Abhängigkeit von der mittleren Effizienz der Wärmeerzeuger vor und nach einer etwaigen Sanierung bei einer Clusteranzahl von zehn

²⁰⁵ Da die Abbildung auf Klassen mit einer Breite von 1% basiert, kann die tatsächliche Effizienz um bis zu 1% vom genannten bzw. dargestellten Wert abweichen.

In Cluster B (vgl. Abbildung 42) liegt die mittlere Effizienz der Wärmeerzeuger vor der Sanierung überwiegend bei 91% (Modalwert) und 93%. Nach dem Austausch der Wärmeversorgungs Pakete treten Effizienzen von 95%, die für gut gedämmte Fernwärmeübergabestationen angesetzt wurden, als Modalwert auf.

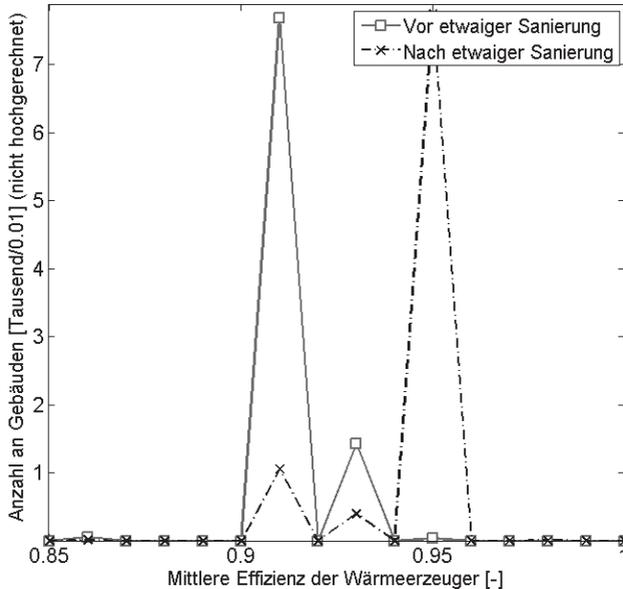


Abbildung 42: Häufigkeiten (ohne Hochrechnung) der zu Cluster B gehörenden Gebäude in Abhängigkeit von der mittleren Effizienz der Wärmeversorger vor und nach einer etwaigen Sanierung bei einer Clusteranzahl von zehn

Schlussfolgerungen

Aus Cluster A lassen sich Mindestanforderungen für Gebäude mit 1-2 Wohneinheiten, Baujahren von 1967-1990, 1927-1950 und 1887-1910 sowie überwiegend gasbasierter Wärmebereitstellung ableiten. Mindestanforderungen an die Wärmedurchgangskoeffizienten von unterem Gebäudeabschluss, Fenstern, oberem Gebäudeabschluss und Außenwand von 0,15, 0,7, 0,12 und 0,12

$W/(m^2 K)$ sollten gesetzt werden, sind aber nur zu erfüllen, sofern die Gebäudehülle saniert wird. Bei der Sanierung des unteren Gebäudeabschlusses und der Fenster gibt es keine weiteren Einschränkungen. Die Mindestanforderungen von Außenwand und Fenstern sind allerdings nur zu erfüllen, falls die Wärmedurchgangskoeffizienten vor der Sanierung mindestens $0,8 W/(m^2 K)$ bei der Außenwand bzw. mindestens $2,57 W/(m^2 K)$ bei den Fenstern betragen. Die Wärmeversorgungspakete sollten gemäß der technischen Lebensdauer der Wärmeerzeuger ausgetauscht werden und weiterhin überwiegend gasbasiert bleiben, wobei eine elektrizitätsbasierte Warmwasserbereitung unterbunden werden sollte. Als Wärmeerzeuger sollten mindestens Niedertemperaturkessel, teilweise aber auch Brennwertkessel, eingesetzt werden. Eine präzisere Differenzierung erfordert eine weiterführende Analyse der Cluster.

Aus Cluster B lassen sich Mindestanforderungen für Gebäude mit mindestens 3 Wohneinheiten, überwiegend fernwärmebasierter Wärmebereitstellung sowie Baujahren bis 1990 (bei Gebäudehüllensanierung und Wärmeerzeugeraustausch) bzw. 2006 (bei Wärmeerzeugeraustausch) ableiten. Für die Gebäudehülle sollten die Mindestanforderungen analog zu Cluster A gesetzt werden, wobei diese für die Außenwände bereits zu erfüllen sind, wenn die Wärmedurchgangskoeffizienten vor der Sanierung mindestens $0,5$ bzw. $0,75$ (statt $0,8$) $W/(m^2 K)$ betragen. Die Mindestanforderungen für die Fenster sind wie bei Cluster A bei Wärmedurchgangskoeffizienten vor der Sanierung von mindestens $2,57 W/(m^2 K)$ zu erfüllen. Die Wärmeversorgungspakete sollten gemäß der technischen Lebensdauer der Wärmeerzeuger ausgetauscht werden und weiterhin überwiegend fernwärmebasiert bleiben, wobei gut gedämmte Übergabestationen eingesetzt und die gas- und elektrizitätsbasierte Warmwasserbereitung unterbunden werden sollten.

7.3.5 Ausgestaltung von Förderpaketen

In diesem Abschnitt sollen gemäß dem in Abschnitt 6.2.3 beschriebenen Ansatz geeignete Förderpakete für die Sanierung des Gebäudebestands identifiziert werden. Dieser Ansatz untergliedert sich in sieben Schritte.

7.3.5.1 Szenarioauswahl

Die Ausgestaltung von Förderpaketen erfolgt unter der Annahme, dass Investitionszuschüsse die Umsetzung der Maßnahmenpakete des Szenarios *Staats-sicht 11* durch eine Kompensation der Kapitalwertverschlechterung aus Selbstnutzersicht im Vergleich zum Szenario *KW11* unterstützen sollen (vgl. Abschnitt 6.2.3). Beim Wechsel zwischen den Szenarien steigt die Reduktion der (stellvertretend betrachteten) direkten²⁰⁶ CO₂-Emissionen (inkl. Emissionen aus Biomasse) von 2006 bis 2030 von 37% auf 44%. Für die Ausgestaltung der Förderpakete werden die Hilfsszenarien *Staatssicht 11 MA* und *KW11 MA* eingesetzt, bei denen die Module Neubau, Abbruch und Haushaltsveränderung deaktiviert wurden.

7.3.5.2 Bestimmung der Kombinationen von Ausgangs- und Endzuständen

Im Szenario *Staatssicht 11 MA* treten 39 unterschiedliche Endzustände, d. h. Maßnahmenpakete nach der Sanierung, auf. In Tabelle 119 sind diejenigen Endzustände aufgelistet, die einen Anteil von mindestens 1% am gesamten CO₂-Emissionsreduktionspotenzial eines Wechsels vom Szenario *KW11 MA* zum Szenario *Staatssicht 11 MA* (vgl. Abschnitt 7.3.1) haben. Diese sechs Endzustände entsprechen 99% des Gesamtpotenzials dieses Wechsels. Im Endzustand 2 wird ein *Wärmeversorgungspaket mit dem Energieträger Gas* eingebaut. In den Endzuständen 36, 30 und 27 wird zusätzlich die *Gebäudehülle mit der höchsten Qualitätsstufe energetisch modernisiert*, wobei bei den Endzuständen 30 und 27 auf die energetische Modernisierung der Fenster bzw. die Dämmung der Außenwände verzichtet wird. In den Endzuständen 38 und 1 wird ein *Wärmeversorgungspaket mit dem Energieträger Holzpellets* bzw. *Fernwärme* eingebaut, wobei in ersterem Falle wiederum die gesamte Gebäudehülle energetisch modernisiert wird. Die Anteile der CO₂-Emissions-

²⁰⁶ Vgl. Fußnote 187 und Abschnitt 8.2 bez. indirekter Emissionen. Diese werden in *AWOHM* nicht berücksichtigt.

reduktionspotenziale reichen von 2% bis 56%, diejenigen der zu fördernden Gebäude von 4% bis zu 91%, wobei die Endzustände mit einer energetischen Modernisierung der Gebäudehülle die höchsten Anteile zu fördernder Gebäude aufweisen.

Tabelle 119: Endzustände im Szenario *Staatssicht 11 MA* mit mindestens 1% Anteil am CO₂-Emissionsreduktionspotenzial eines Wechsels vom Szenario *KW11 MA*

ID Endzustand	Qualitätsstufen Gebäudehülle				Typisierung der Wärmeversorgungs Pakete anhand der eingesetzten Energieträger	Anteil am CO ₂ -Emissionsreduktionspotenzial (inkl. Biomasse)	Anteil zu fördernder Gebäude
	Oberer Gebäudeabschluss	Wand	Fenster	Unterer Gebäudeabschluss			
2	0	0	0	0	3 (Gas)	56%	43%
36	11	11	11	11	3 (Gas)	28%	91%
30	11	11	0	11	3 (Gas)	8%	88%
27	11	0	11	11	3 (Gas)	3%	90%
38	11	11	11	11	7 (Holz(pellets))	2%	74%
1	0	0	0	0	1 (Fernwärme)	2%	4%

In Tabelle 120 sind für diese 6 Endzustände die Quantile der notwendigen Fördersätze auf Gebäudeebene bei flächenspezifischer und anteiliger Förderung angegeben. Sollen 90% des CO₂-Emissionsreduktionspotenzials ausgenutzt werden, zeigt das Verhältnis der 90%- zu den 50%-Quantilen, dass bei den betrachteten Endzuständen eine anteilige Förderung gleichmäßiger²⁰⁷ ist als eine flächenspezifische Förderung. Bei einer flächenspezifischen Förderung von 16 €/m² (Wohnfläche) würden bspw. bei Endzustand 2 90% der Gebäude überfordert. Bei 50% der Gebäude entsprächen diese 16 €/m² einer „Überförderung“ und bei 75% mindestens 7 €/m² (16-9).

Tabelle 120: Quantile der notwendigen Fördersätze auf Gebäudeebene bei flächenspezifischer und anteiliger Förderung bei den Endzuständen mit mindestens 1% Anteil am CO₂-Emissionsreduktionspotenzial im Szenario *Staatssicht 11 MA*

ID Endzustand	(Wohn-)Flächenspezifische Förderung [€/m ²]						Anteilige Förderung [-]					
	Quantile						Quantile					
	25%	50%	75%	90%	100%	90%/50%	25%	50%	75%	90%	100%	90%/50%
2	0	0	9	16	356	-	0%	3%	21%	21%	42%	7,1
36	5	11	20	32	385	2,9	2%	5%	9%	13%	36%	2,4
30	4	9	15	23	168	2,7	2%	5%	8%	12%	29%	2,4
27	4	9	15	20	58	2,2	1%	6%	10%	13%	27%	2,0
38	0	2	11	22	164	12,9	0%	1%	3%	6%	15%	8,8
1	0	0	0	0	62	-	0%	0%	0%	0%	251%	-

²⁰⁷ Gleichmäßiger (bzw. homogener) bedeutet in diesem Zusammenhang, dass die relative Abweichung der notwendigen Fördersätze (und damit auch die Überförderung) der zu einem Endzustand gehörenden Gebäude geringer ist.

Prinzipiell steigt mit zunehmender Inhomogenität der durch die Endzustände definierten Förderpakete entweder die Überförderung, oder der Ausnutzungsgrad des CO₂-Emissionsreduktionspotenzials sinkt. Ein Endzustand kann dabei von unterschiedlichen Ausgangszuständen, d. h. Zuständen vor der Sanierung, erreicht werden, sodass die Homogenität der Förderpakete durch eine Differenzierung der Ausgangszustände erhöht werden kann. Die sechs betrachteten Endzustände werden im Szenario *Staatssicht 11 MA* bspw. von 14 bis 248 unterschiedlichen Ausgangszuständen erreicht.

7.3.5.3 Bestimmung der mittleren Förderausgaben pro Umweltverbesserung in Abhängigkeit von der kumulierten Umweltverbesserung

Abbildung 43 zeigt die nach dem Schema in Tabelle 94 bestimmten mittleren Förderausgaben pro CO₂-Vermeidung [€/t] in Abhängigkeit von der kumulierten CO₂-Vermeidung [t] bei unterschiedlichen Differenzierungen der Förderpakete. Die Ergebnisse beziehen sich auf das SUF des Mikrozensus 2006, wobei auf eine Hochrechnung mittels Hochrechnungsfaktoren verzichtet wurde. Unabhängig von der Differenzierung der Förderpakete können die CO₂-Emissionen maximal um 2,2 Mt gemindert werden. Wird eine vorgegebene CO₂-Emissionsminderung anvisiert, so führen individuelle Förderpakete je Gebäude zu den niedrigsten und eine reine Differenzierung nach Endzuständen zu den höchsten Förderausgaben. Werden vorgegebene mittlere Förderausgaben pro Minderung direkter CO₂-Emissionen anvisiert, so führen individuelle Förderpakete zur größten und eine reine Differenzierung nach Endzuständen zu der niedrigsten CO₂-Emissionsminderung. Werden die Förderpakete nach Ausgangs- und Endzustand differenziert, so liegen die Förderausgaben bzw. die CO₂-Emissionsminderungen zwischen denjenigen der individuellen Förderpakete je Gebäude und denen bei reiner Differenzierung nach Endzuständen.

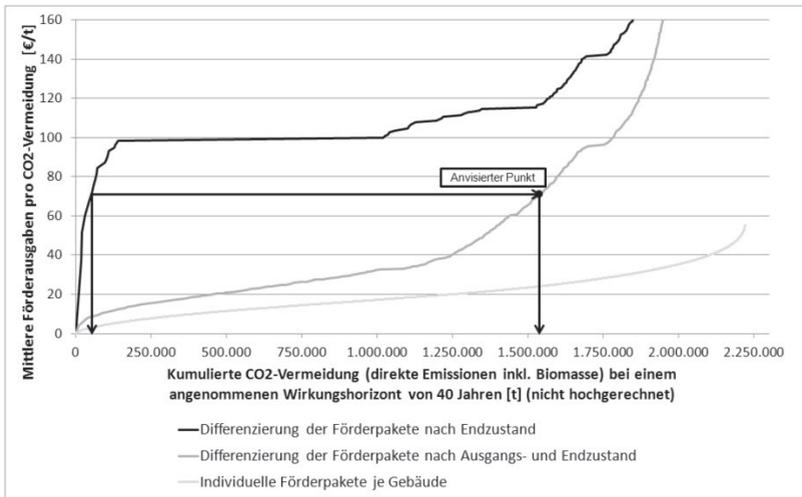


Abbildung 43: Mittlere Förderausgaben pro CO₂-Vermeidung (direkte Emissionen inkl. Biomasse) in Abhängigkeit von der kumulierten CO₂-Vermeidung bei unterschiedlichen Differenzierungen der Förderpakete

7.3.5.4 Auswahl einer Kombination von mittleren Förderausgaben pro Umweltverbesserung und kumulierter Umweltverbesserung

Im Folgenden werden in Anlehnung an CO₂-Schadenskosten nach Schwermer (2007) mittlere Förderausgaben von 70 €/t²⁰⁸ anvisiert (vgl. „Anvisierter Punkt“ in Abbildung 43). Bei individueller Förderung wäre dann eine CO₂-Emissionsreduktion (bei einem für die Maßnahmen angenommenen Wirkungshorizont von 40 Jahren²⁰⁹) von knapp 2,2 Mt erreichbar, bei Differenzierung nach Endzustand 0,1 Mt und bei Differenzierung nach Ausgangs- und

²⁰⁸ Gemäß der Europäischen Kommission (2012) sollen als Kosten von CO₂-Emissionen prognostizierte CO₂-Zertifikats-Preise von mindestens 20 €/t bis 2025, 35 €/t bis 2030 und 50 €/t ab 2030 angesetzt werden (gemessen in realen und konstanten Preisen 2008). Bei der Verwendung dieser Werte würden *ceteris paribus* niedrigere Förderausgaben und eine niedrigere CO₂-Vermeidung resultieren.

²⁰⁹ Der angenommene Wirkungshorizont entspricht der in AWOHM angesetzten Lebensdauer von Hüllpaketen (vgl. Tabelle 99). Bei geförderten Wärmeerzeugern wird implizit davon ausgegangen, dass nach Ablauf ihrer Lebensdauer ohne erneute Förderung wieder derselbe Wärmeerzeugertyp eingebaut wird.

Endzustand 1,5 Mt. Durch eine Differenzierung der Ausgangszustände ließen sich also die theoretischen Reduktionspotenziale um ca. 1400% steigern. 1,5 Mt CO₂-Emissionsreduktion für die Stichprobe des SUF 2006 entsprächen bei einem Hochrechnungsfaktor von ca. 150 einer Minderung von ca. 225 Mt im gesamten Gebäudebestand und zugehörigen Förderausgaben von ca. 16 Mrd. €. Bei gleichmäßiger Verteilung der Förderausgaben auf die Jahre 2007 bis 2030, den Zeitraum der Umsetzung der Maßnahmen, entspricht dies ca. 0,7 Mrd. €/a, also weniger als die Finanzmittel des Bundes für das CO₂-Gebäudesanierungsprogramm im Jahr 2007.²¹⁰

7.3.5.5 Bestimmung des Ausnutzungsgrades der Umweltverbesserung in Abhängigkeit von der Förderpaketanzahl

Die zu dem anvisierten Punkt (1,5 Mt; 70 €/t) gehörende Menge an Förderpaketen umfasst allerdings ca. 300 Förderpakete mit entweder prozentualer oder anteiliger Förderung. Eine generelle Beschränkung auf einen dieser Fördermechanismen führt zu einer Reduktion der maximal erreichbaren CO₂-Vermeidung, da je nach Förderpaket entweder die prozentuale oder die anteilige Förderung effizienter sein kann. Im Folgenden wird exemplarisch nur die flächenspezifische Förderung betrachtet. Dadurch sinkt die maximal erreichbare CO₂-Vermeidung von 1,54 Mt auf 1,49 Mt bei 304 Förderpaketen. Um die die Praktikabilität der Förderung zu erhöhen, kann die Förderpaketanzahl reduziert werden. Hierzu können die Methoden *Zusammenlegung und Auswahl* sowie *Reine Elimination* eingesetzt werden (vgl. Abschnitt 6.2.3). Bei beiden Methoden führt eine Reduktion der Förderpaketanzahl bei Beibehaltung der mittleren Förderausgaben pro CO₂-Vermeidung von 70 €/t zu einer Reduktion des Ausnutzungsgrades der anvisierten CO₂-Vermeidung (d. h. im Vergleich zu 1,5 bzw. 225 Mt). In Abbildung 44 sind für beide Methoden die Ausnutzungs-

²¹⁰ Die Finanzmittel des Bundes für das CO₂-Gebäudesanierungsprogramm lagen im Jahr 2007 bei 0,85 Mrd. € und für das nicht auf Wohngebäude beschränkte Marktanzreizprogramm „Erneuerbare Energien“ bei ca. 0,2 Mrd. € (Matthes u. a. 2009).

grade der CO₂-Vermeidung bei mittleren Förderausgaben von 70 €/t in Abhängigkeit von der Förderpaketanzahl bei Beschränkung auf die flächenspezifische Förderung dargestellt.²¹¹ Die die Clusteranalyse nutzende Methode *Zusammenlegung und Auswahl* führt zu einem deutlich höheren Ausnutzungsgrad. Bei ihr sinkt der Ausnutzungsgrad von 95% bei 25 Förderpaketen über 90% bei 13 Förderpaketen bis auf 41% bei einem Förderpaket.

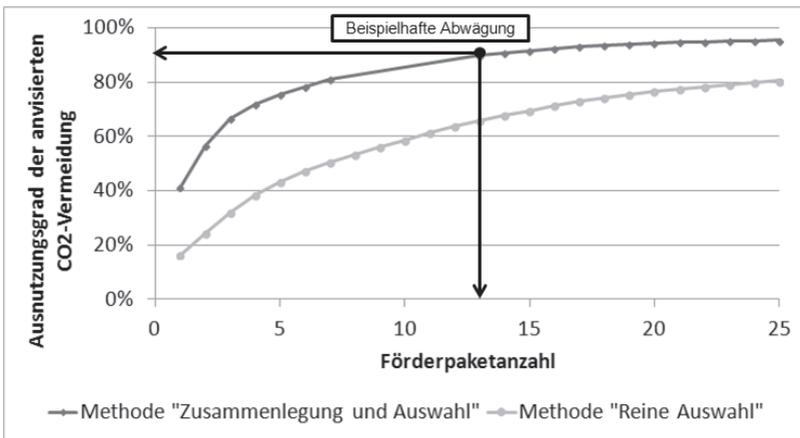


Abbildung 44: Ausnutzungsgrad der anvisierten CO₂-Vermeidung (direkte Emissionen inkl. Biomasse) bei mittleren Förderausgaben von 70 €/t in Abhängigkeit von der Förderpaketanzahl (nur Mengen zulässiger Förderpakete sind als Datenpunkt eingezeichnet)

²¹¹ Bei der Methode *Zusammenlegung und Auswahl* kann es vorkommen, dass die Menge der Förderpakete nicht zulässig ist und der Ausnutzungsgrad eine obere Schranke darstellt. Stets zulässige Kombinationen lassen sich durch vollständige Enumeration ableiten. Diese erfordert aber hohe Laufzeiten, sodass dieser das in Abschnitt 6.2.3.2.5 beschriebene Verfahren mit anschließender Überprüfung der Zulässigkeit vorgezogen wird. Für die Anwendung in dieser Arbeit wurde jedoch zusätzlich die vollständige Enumeration durchgeführt. Die Überschätzung des Ausnutzungsgrades gemäß vollständiger Enumeration durch die obere Schranke im Falle unzulässiger Mengen von Förderpaketen lag bei maximal 0,4%.

7.3.5.6 Auswahl von Förderpaketanzahl und Spezifikation

Im Folgenden wird exemplarisch davon ausgegangen, dass 13 Förderpakete (zulässig) aufgesetzt werden sollen, die mit der Methode *Zusammenlegung und Auswahl* identifiziert wurden (vgl. Abbildung 44). Bei dem zugehörigen Ausnutzungsgrad von 90% liegt die CO₂-Emissionsminderung um ca. 2600% über der maximalen bei reiner Differenzierung der Endzustände, bei der jedoch 20 Förderpakete notwendig wären.

7.3.5.7 Transformation der Förderpaketspezifikation in eine anwendungsorientierte Form

Tabelle 121 gibt einen Überblick über die 13 Förderpakete mit zugehörigen Endzuständen und CO₂-Vermeidungen. Die Förderpakete fassen jeweils mehrere, aber nicht alle Ausgangszustände, die zu einem Endzustand führen, zusammen. Die Förderpakete 1 bis 8 bzw. 10 und 11 stammen bspw. aus der Unterteilung von Endzustand 2 bzw. 30 in 29 bzw. 8 Cluster. Hinsichtlich der zu fördernden Endzustände wird bei den Förderpaketen 1 bis 8 der Einbau eines gasbasierten Wärmeversorgungspakets ohne energetische Verbesserung der Gebäudehülle gefördert. Bei den fünf übrigen Förderpaketen umfassen alle die energetische Modernisierung des oberen und des unteren Gebäudeabschlusses, vier die Dämmung der Außenwände und drei die energetische Modernisierung der Fenster. Unter den Förderpaketen mit energetischer Modernisierung der Gebäudehülle umfassen vier den Einbau eines gasbasierten Wärmeversorgungspakets und eines den Einbau eines Holzpelletkessels.

Tabelle 121: 13 Förderpakete bei mittleren Förderausgaben pro CO₂-Vermeidung (direkte Emissionen inkl. Biomasse) von 70 €/t bei Identifizierung mit der Methode *Zusammenlegung und Auswahl*

ID Förderpaket	ID Endzustand	CO ₂ -Vermeidung [t]	CO ₂ -Vermeidung pro Paket [t]	Zu fördernder Endzustand				Typisierung der Wärmeversorgungspakete anhand der eingesetzten Energieträger
				Qualitätsstufen Gebäudehülle				
				Oberer Gebäudeabschluss	Wand	Fenster	Unterer Gebäudeabschluss	
1-8	2	8	1.037.654	0	0	0	0	3 (Gas)
9	36	1	154.302	11	11	11	11	3 (Gas)
10-11	30	2	106.793	11	11	0	11	3 (Gas)
12	27	1	53.932	11	0	11	11	3 (Gas)
13	38	1	25.363	11	11	11	11	7 (Holz(pellets))

Im Folgenden wird exemplarisch anhand der Förderpakete 4, 6, 10 und 11 aufgezeigt, wie diese in eine anwendungsorientierte Form gebracht werden können. Diese Förderpakete umfassen 7, 11, 16 und 10 Ausgangszustände, die jeweils einem Endzustand zugeordnet sind. Die Anteile der Wärmeversorgungspakettypen, der energetische Zustand der Gebäudehüllen und die Förderhöhen der zu den Förderpaketen gehörenden Ausgangszustände (nicht der Gebäude), die eine positive Förderung erhalten sollen, sind in Tabelle 122 dargestellt. Die Förderpakete 4 und 6 beziehen sich auf Gebäude, bei denen nur der Austausch des Wärmeversorgungspakets ansteht, die Förderpakete 10 und 11 dahingegen auf Gebäude, bei denen gleichzeitig die Sanierung der Gebäudehülle und der Austausch des Wärmeversorgungspakets anstehen.

Tabelle 122: Verteilung der Wärmeversorgungspakettypen, energetischer Zustand der Gebäudehüllen und Förderhöhen der zu den Förderpaketen 4, 6, 10 und 11 gehörenden Ausgangszustände mit positiver Förderung

ID Förderpaket	Anteile der Wärmeversorgungspakettypen[%]			Energetischer Zustand der Gebäudehülle: X: (nachträglich) energetisch modernisiert (X): teilweise (nachträglich) energetisch modernisiert -: im Urzustand				Förderhöhe [€/m ²] (Wohnfläche)
	Heizöl	Holz (pellets)	Sonstige fossile Energieträger	Oberer Gebäudeabschluss	Wand	Fenster	Unterer Gebäudeabschluss	
4	-	60	40	-	-	X	-	21
6	60	40	-	X	X	X	-	34
10	-	20	80	(X)	(X)	(X)	-	14
11	100	-	-	X	X	X	(X)	12

Steht (nur) der Austausch des Wärmeversorgungspakets an, so wird bei einer vor der Modernisierung auf sonstigen fossilen Energieträgern, Holz oder Holzpellets²¹² basierenden Wärmeversorgung gemäß Förderpaket 4 mit einem Fördersatz von 21 €/m² (Wohnfläche) gefördert, falls die Wärmeversorgung auf Gas umgestellt wird, die Fenster bereits energetisch modernisiert wurden und die sonstigen Gebäudehüllenelemente sich in energetischer Hinsicht noch

²¹² Ein Energieträgerwechsel von Holz oder Holzpellets zu Gas kann bei dem angewandten Ansatz „förderwürdig“ sein, da dieser u. a. eine Reduktion der Emissionen an CO₂ inkl. Emissionen aus Biomasse (sowie der Luftschadstoffemissionen und des gesamten Primärenergieverbrauchs) bewirkt. Dies steht der aktuellen Förderpraxis entgegen, die sich auf den fossilen Primärenergieverbrauch und CO₂-Emissionen exkl. Emissionen aus Biomasse fokussiert.

im Urzustand befinden.²¹³ Wurden allerdings bereits der obere Gebäudeabschluss, die Außenwände und die Fenster energetisch modernisiert und basiert die Wärmeversorgung dahingegen auf Heizöl, Holz oder Holzpellets, so wird für den Einbau einer gasbasierten Wärmeversorgung mit 34 €/m² eine um 62% höhere Förderung gewährt. Die Unterschiede zwischen den Förderätzen sind auf das Verhältnis von Kapitalwertverschlechterung und CO₂-Vermeidung bei einem vom wirtschaftlichsten Maßnahmenpaket abweichenden Maßnahmenpaket und auf die Homogenität der Cluster zurückzuführen. Durch die reine Umstellung der Wärmeversorgung auf den Energieträger Gas, bzw. konkreter auf einen Gasbrennwertkessel, können die CO₂-Emissionen reduziert werden, wobei die Umstellung bei einem Teil der Gebäude nicht dem wirtschaftlichsten Maßnahmenpaket entspricht. Gemäß dem folgenden, vereinfachenden Erklärungsansatz müsste im Förderpaket 4 zwar ein Gaskessel die wirtschaftlichste Variante darstellen, aber dieser entspräche zumindest in einigen Fällen einem Niedertemperaturkessel, sodass die durch einen Brennwertkessel bedingte Kapitalwertverschlechterung durch die Förderung kompensiert werden muss. Eine Differenzierung der Kesseltypen muss demnach in die Förderpaketspezifikation aufgenommen werden. In Förderpaket 6 wäre dahingegen wegen des bereits existierenden Heizöltanks ein Ölkessel die wirtschaftlichste Variante, sodass die Kapitalwertverschlechterung durch den Anschluss an das Gasnetz, die Entsorgung des Öltanks und einen etwaigen Einsatz eines Brennwertkessels kompensiert werden muss. Da die Kapitalwertverschlechterung durch den Einsatz von Brennwerttechnik wegen der bereits erfolgten energetischen Modernisierung zudem stärker ins Gewicht fällt, kann die höhere Förderung erklärt werden.

Steht sowohl der Austausch des Wärmeversorgungspakets als auch die Sanierung der Gebäudehülle an, so werden in Förderpaket 11 Gebäude mit einer auf

²¹³ Auf eine Differenzierung nach der Gebäudegröße und anderen Merkmalen wurde verzichtet, um die Komplexität bzw. die Anzahl möglicher Kombinationen nicht weiter zu erhöhen. Eine derartige Differenzierung kann aber prinzipiell in den Ansatz integriert werden, bspw. wie in Abschnitt 6.2.2.

Heizöl basierenden Wärmeversorgung mit 12 €/m² gefördert, sofern die Wärmeversorgung auf Gas umgestellt wird und die Gebäudehülle mit Ausnahme der Fenster gemäß der höchsten Qualitätsstufe modernisiert wird. Als Fördervoraussetzung muss die gesamte Gebäudehülle, ggf. mit Ausnahme des unteren Gebäudeabschlusses, bereits zuvor energetisch modernisiert worden sein, da das Maßnahmenpaket vermutlich sonst bereits ohne Förderung wirtschaftlich wäre. Basiert die Wärmeversorgung vor der Sanierung dahingegen auf sonstigen fossilen Energieträgern, Holz oder Holzpellets, so wird dasselbe Maßnahmenpaket mit 14 €/m² gefördert. Als Fördervoraussetzung muss sich der untere Gebäudeabschluss in energetischer Hinsicht noch im Urzustand befinden. Die übrigen Gebäudehüllenelemente können bereits, müssen aber nicht, energetisch modernisiert worden sein.

Einschränkungen

Die exemplarische Ableitung der Förderpaketspezifikationen basierend auf den identifizierten Clustern soll nur die prinzipielle Vorgehensweise aufzeigen. Der erreichte Differenzierungsgrad, bspw. derjenige der Wärmeversorgungspakettypen, ist noch nicht hinreichend für eine Anwendung in der Praxis. Für eine exakte Spezifikation der Förderpakete muss eine detailliertere Analyse der den Förderpaketen zugeordneten Gebäude erfolgen. Insbesondere muss auch die Abgrenzung zu den verbleibenden neun Förderpaketen, zu den nicht zu fördernden Gebäuden sowie zu den im vorigen Abschnitt identifizierten Mindestanforderungspaketen sichergestellt werden, um Fehl- bzw. Überförderungen zu vermeiden. Ggf. bietet sich auch eine Aufnahme weiterer Merkmale zur schärferen Charakterisierung der Förderpakete an, entweder vor der Durchführung der Clusteranalyse oder zur nachträglichen Analyse.

Die in *AWOHM* angesetzten Preise für Maßnahmen(pakete) und Energieträger sind als mittlere Preise zu interpretieren. Es gibt allerdings teilweise erhebliche Preisschwankungen, die Einfluss auf die Wirtschaftlichkeit von Maßnahmenpaketen und damit auf die notwendigen Fördersätze nehmen. Diese wären bei einer Übertragung der Ergebnisse in die Praxis zu berücksichtigen.

Wurden bereits vor einer anstehenden Sanierung energetische Modernisierungsmaßnahmen durchgeführt, so beeinflusst dies sowohl die Wirtschaftlichkeit als auch die Umweltverbesserung eines Übergangs zu einem Endzustand. Daher umfassen die Fördervoraussetzungen teilweise auch Anforderungen hinsichtlich eines hinreichend schlechten Ausgangszustandes. Dies kann jedoch dazu führen, dass bspw. Gebäude, die bereits teilweise gedämmt wurden, die Fördervoraussetzungen nicht erfüllen. Diese fallen dann in ein anderes potenzielles Förderpaket (eventuell mit Förderung 0), das ggf. von untergeordneter Bedeutung ist und daher bei vorgegebener Förderpaketanzahl nicht berücksichtigt wird. Um energetische Modernisierungsaktivitäten der Vergangenheit nicht zu „bestrafen“, könnten ggf. spezielle Förderpakete für derartige Fälle spezifiziert werden. Da derartige Modernisierungsaktivitäten aus Sicht der Eigentümer allerdings häufig bereits wirtschaftlich waren, ist dies nicht erforderlich.

7.4 Ausschöpfbares Potenzial

Dieser Abschnitt hat einen Bezug zu folgenden (Teil-)Forschungsfragen:

- Wie groß sind die *ausschöpfbaren* Reduktionspotenziale für Treibhausgas- und Luftschadstoffemissionen sowie den Primärenergieverbrauch?
- Wie verteilen sich die techno-ökonomischen Potenziale auf soziodemographische Cluster?
- Welche Akteure tragen die Hauptlasten der Transformation des Energiesystems Wärmenutzung in Wohngebäuden, und führt dies zur übermäßigen Belastung einkommensschwacher Haushalte?
- Wie können diese Hauptlasten verschoben werden, um die Transformation für Wohngebäudeeigentümer und -bewohner möglichst „zumutbar“ zu gestalten?
- Welche Bündel umweltpolitischer Instrumente sind für den Bereich der Wärmenutzung in Wohngebäuden geeignet, um die Treibhausgas- und Luftschadstoffemissionen sowie den Primärenergieverbrauch zu reduzieren?

In Abschnitt 7.4.1 werden Szenarien definiert, die in Abschnitt 7.4.2 zur Bestimmung der ausschöpfbaren Reduktionspotenziale für Treibhausgas- und Luftschadstoffemissionen sowie den Primärenergieverbrauch herangezogen werden. Das ausschöpfbare Potenzial sei definiert als der Teil des ökonomischen Potenzials, der in der Realität genutzt werden kann. Die Ausnutzung des ökonomischen Potenzials wird bspw. durch mangelnde Möglichkeiten zur Finanzierung, Informationsdefizite und Sanierungsunwilligkeit behindert (vgl. Kapitel 4). Das ausschöpfbare Potenzial ist daher neben den technischen und ökonomischen Randbedingungen des Gebäudes auch von umweltpolitischen Instrumenten sowie Charakteristika der Gebäudeeigentümer und -bewohner abhängig. Diese Instrumente und Charakteristika werden daher in den Abschnitten 7.4.1 und 7.4.2 variiert. Eine Plausibilisierung des ausschöpfbaren Potenzials mittels Literaturdaten erfolgt, soweit möglich, in Abschnitt 7.4.3. In Abschnitt 7.4.4 wird analysiert, wie die umweltpolitischen Instrumente an vielversprechende Zielgruppen, d. h. homogene und interpretierbare Haushalts- und Gebäudecluster mit beträchtlichen ökonomischen Potenzialen, angepasst werden können. Abschließend wird in Abschnitt 7.4.5 untersucht, inwieweit sich durch die Ausschöpfung von Potenzialen „soziale Brennpunkte“ im Sinne übermäßiger finanzieller Belastung insbesondere einkommensschwacher Haushalte ergeben können.

7.4.1 Szenarien

Tabelle 123 fasst die Definition von 15 ausschöpfbaren Potenzialszenarien zusammen, d. h. derjenigen Szenarien, die zur Bestimmung der ausschöpfbaren Reduktionspotenziale für Treibhausgas- und Luftschadstoffemissionen sowie den Primärenergieverbrauch eingesetzt werden. Die Definition erfolgt in Bezug auf die Basisszenarien (vgl. Tabelle 99 in Abschnitt 7.1), wobei nur von den Basisszenarien abweichende Szenarioelemente spezifiziert werden.

Prinzipiell werden Extremszenarien und Prognoseszenarien unterschieden. Mittels Extremszenarien werden Entwicklungspfade simuliert, bei denen alle Gebäudeeigentümer von einem annahmenbasierten Entscheidertypen sind bzw. gemäß einer annahmenbasierten Entscheiderstrategie entscheiden (vgl. Abschnitt 5.4.4). Somit kann analysiert werden, welche Entscheidertypen und -strategien die Entwicklungspfade aus Staatssicht verbessern bzw. verschlechtern. Darauf aufbauend können umweltpolitische Instrumente zur Unterbindung von Fehlentwicklungen und Unterstützung vielversprechender Teilentwicklungen identifiziert werden. Dem Vorgehen liegt die Annahme zugrunde, dass die Gesamtbevölkerung jeweils zu bestimmten Anteilen entsprechenden Entscheidertypen und -strategien zugeordnet werden kann. Im Szenario *Ausbesserer 11* wird die Gebäudehülle nicht energetisch modernisiert. Die Wärmerversorgungspakete werden nach Ablauf der Lebensdauer ausgetauscht, wobei möglichst keine Energieträger- und Verrohrungswechsel durchgeführt werden. Im Szenario *Mindestmaßsanierer 9* werden die an die EnEV 2009 angelehnten Mindestanforderungen gerade eingehalten, wobei diese im Szenario *Mindestmaßsanierer 11* gemäß $H++++W^{**214}$ erhöht werden. Im Szenario *Ökonom I 11* werden gehemmte ökonomische Entscheidungen simuliert, wobei im Gegensatz zu den ökonomischen Potenzialen nicht von einem langfristigen, sondern von einem mittel- bis langfristigen Planungshorizont ausgegangen wird. Bei Selbstnutzern beeinflussen zudem die finanzielle Situation der Eigentümer und die Konformität der Maßnahmenpakete mit den Mindestanforderungen die Entscheidungen. Im Szenario *Ökonom II 11* wird bei gleichem Entscheidungsansatz für die Selbstnutzer dahingegen von einem langfristigen Planungshorizont bei Vermietern ausgegangen. Im Szenario *Ökomodernisierer 11* wird analog zum Szenario *TP Primärenergie nicht erneuerbar* das Maßnahmenpaket mit minimalem nicht erneuerbarem Primärenergieverbrauch gewählt, wobei dieses Szenario im Vergleich zu dem Szenario *Ökomodernisierer 11 W** höhere Mindestanforderungen an die Wärmeerzeuger stellt, u. a. die

²¹⁴ Vgl. Fußnote 192.

obligatorische Verwendung von Partikelabscheidern beim Einbau von Holzpelletkesseln. Die Extremszenarien dienen damit der Simulation von typisiertem Extremverhalten und nicht der Prognose der Gesamtentwicklung.

Daher werden zudem Prognoseszenarien definiert, die entsprechende Prognosen ermöglichen. Dabei wird in den Szenarien *Prognose Stieß-Schätzl 9* und *Prognose Stengel 9* die Häufigkeit der Entscheidertypen und -strategien unter den Gebäudeeigentümern abgeschätzt und jedem individuellen Gebäude ein Typ bzw. eine Strategie zugeordnet. Als Basis dafür dienen bei *Prognose Stieß-Schätzl 9* empirische Erhebungen zu Sanierungseinstellungen und geplanten Sanierungen. Bei *Prognose Stengel 9* werden die Gebäudeeigentümer den Entscheidertypen und -strategien basierend auf der Eigentümerstruktur und den sozio-demographischen Eigenschaften der Bewohner zugeordnet (vgl. Abschnitt 5.4.4). In den Szenarien *Prognose Modell A 9* und *Prognose Modell B 9* werden für die Selbstnutzer dahingegen empirisch basierte Entscheidungsansätze (vgl. Abschnitt 5.4.4) eingesetzt.

Da im Szenario *Prognose Stengel 9* die hinsichtlich der Sanierungsrate plausibelsten Entwicklungspfade resultieren, werden basierend auf diesem durch die Variation der umweltpolitischen Instrumente zudem vier weitere Szenarien definiert, um vielversprechende Instrumente zu identifizieren. Im Szenario *Prognose Stengel 11* werden die Mindestanforderungen verschärft, in den Szenarien *Prognose 11 \$\$\$* bzw. *Prognose 11 \$\$\$ Steuer* Investitionszuschüsse gewährt bzw. zudem die steuerliche Abzugsfähigkeit energetischer Modernisierungen bei selbstnutzenden Eigentümern ermöglicht. Im Szenario *Prognose 11 ###* werden die Energiepreise um 50% erhöht.

Tabelle 123: Definition der Szenarien zur Bestimmung der ausschöpfbaren Potenziale (ausschöpfbare Potenzialszenarien) durch Spezifikation der von den Basisszenarien abweichenden Szenarioelemente (Datengrundlage: Annahmen)

Szenariotyp	Kürzel	Szenario name (KW: Kapitalwert)	Entscheidungsansätze Selbstnutzer (A, B)	Vermieter (C, D, E)	Umweltpolitische Instrumente	Steuerl. Absetzbarkeit	Energie-steuern
Extrem Szenario	A1	Ausbesserer I 1	Ausbesserer	Abbruchstrategie	H + + + + W**	Nein	#
	A2	Mindestmaßsaniierer 9	Mindestmaßsaniierer	Substanzerhaltungsstrategie Basis	H + + + W*	Nein	#
	A3	Mindestmaßsaniierer 11	Mindestmaßsaniierer	Substanzerhaltungsstrategie Basis	H + + + + W**	Nein	#
	A4	Ökonom I 11	Ökonom	Substanzerhaltungsstrategie Erweitert	H + + + + + W**	Nein	#
	A5	Ökonom II 11	Ökonom	Langfristige Modernisierungsstrategie	H + + + + + W**	Nein	#
	A6	Ökomodernisierer 11 W*	Ökomodernisierer	Ökomodernisierungsstrategie	H + + + + + W**	Nein	#
	A7	Ökomodernisierer 11	Ökomodernisierer	Ökomodernisierungsstrategie	H + + + + + W**	Nein	#
	A8	Prognose Stiefel-Schatzl 9	Zufallsziehung Stiefel	Zufallsziehung Schatzl	H + + + + W*	Nein	#
	A9	Prognose Modell A 9	A: Detail B: Zufallsziehung Selbstnutzer Stengel	Zufallsziehung Vermieter Stengel	H + + + W*	Nein	#
	A10	Prognose Modell B 9	A: Konsistenz B: Zufallsziehung Selbstnutzer Stengel	Zufallsziehung Stengel	H + + + W*	Nein	#
Prognoseszenario	A11	Prognose Stengel 11	Zufallsziehung Selbstnutzer Stengel	Zufallsziehung Vermieter Stengel	H + + + + + W**	Nein	#
	A12	Prognose Stengel 11 \$\$\$	Zufallsziehung Selbstnutzer Stengel	Zufallsziehung Vermieter Stengel	H + + + + + W**	Nein	#
	A13	Prognose Stengel 11 \$\$\$ Steuer	Zufallsziehung Selbstnutzer Stengel	Zufallsziehung Vermieter Stengel	H + + + + + W**	Ja	#
	A14	Prognose Stengel 11 ###	Zufallsziehung Selbstnutzer Stengel	Zufallsziehung Vermieter Stengel	H + + + + + W**	Nein	###

7.4.2 Emissionsminderungs- und Energieeinsparpotenziale

Tabelle 124 fasst die Reduktionen der direkten²¹⁵ verbrennungsbedingten CO₂-, CH₄-, PM-, NO_x-, SO₂- und NMVOC-Emissionen sowie des End- und Primärenergieverbrauchs des Wohngebäudebestands in Deutschland für Raumwärme und Warmwasser von 2006 bis 2030 in den ausschöpfbaren Potenzialszenarien zusammen. Als Referenz ist zudem das ökonomische Minderungspotenzial gemäß den Szenarien *KW11* und *Staatsicht 11* dargestellt.

Tabelle 124: Reduktionen der direkten verbrennungsbedingten CO₂-, CH₄-, NO_x-, SO₂-, NMVOC- und PM-Emissionen sowie des End- und Primärenergieverbrauchs des Wohngebäudebestands in Deutschland für Raumwärme und Warmwasser von 2006 bis 2030 in den ausschöpfbaren Potenzialszenarien

Szenariotyp	Indikator	Reduktion bis 2030 in Bezug auf 2006 [%]											
		Emissionen								Energieverbrauch			Gesamtindikator
		CO ₂	CO ₂ (exkl. Biomasse)	CH ₄	NO _x	SO ₂	NMVOC	PM	End	Primär (nicht erm.)	Primär (gesamt)		
Referenz	Szenario												
Extrem	KW11	37	36	35	44	70	61	74	35	35	35	0,555	
	Staatsicht 11	44	43	-14	71	82	66	75	37	37	37	0,565	
	Ausbesserer 11	0	-1	52	-2	3	45	61	0	0	1	0,485	
	Mindestmaßsanierer 9	30	29	64	30	35	63	69	29	30	30	0,538	
	Mindestmaßsanierer 11	39	38	69	38	43	67	77	38	38	39	0,552	
	Ökonom I 11	20	58	48	1	71	58	56	31	53	36	0,543	
	Ökonom II 11	24	62	52	4	73	61	58	35	57	41	0,549	
	Ökomodernisierer 11 W*	14	85	65	-29	77	62	-71	37	76	46	0,515	
	Ökomodernisierer 11	14	85	64	-28	77	61	43	37	76	46	0,526	
	Prognose	Prognose Stieß-Schätzl 9	15	66	59	-14	66	60	-10	32	60	38	0,524
	Prognose Stengel 9	12	22	53	5	27	51	48	15	22	17	0,510	
	Prognose Modell A 9	25	28	43	27	50	58	62	25	28	27	0,535	
	Prognose Modell B 9	25	28	43	27	50	58	61	25	28	27	0,535	
	Prognose Stengel 11	15	26	56	8	29	52	62	19	26	21	0,517	
	Prognose Stengel 11 \$\$\$	15	26	55	8	29	52	62	19	26	21	0,481	
	Prognose Stengel 11 \$\$\$ Steuer	15	26	56	8	29	52	62	19	26	21	0,462	
	Prognose Stengel 11 ###	16	26	55	9	29	52	62	19	26	21	0,471	
Alle	Min	0	-1	-14	-29	3	45	-71	0	0	1	0,462	
	Max	44	85	69	71	82	67	77	38	76	46	0,565	

Extremszenarien

Im Szenario *Ausbesserer 11* resultieren für den Gebäudebestand modernisierungsbedingte Emissions- und Energieverbrauchsreduktionen ausschließlich

²¹⁵ Vgl. Fußnote 187 und Abschnitt 8.2 bez. indirekter Emissionen. Diese werden in *AWOHM* nicht berücksichtigt.

durch höhere Jahresnutzungsgrade und niedrigere Emissionsfaktoren der nach Ablauf der Lebensdauer ausgetauschten Wärmeversorgungsanlagen, wobei möglichst keine Energieträgerwechsel und Verrohrungswechsel durchgeführt werden. Diese Einsparungen werden allerdings trotz des Abbruchs von Gebäuden überwiegend durch das Hinzukommen von Neubauten kompensiert, sodass mit Ausnahme der zwischen 45% und 61% liegenden Emissionsreduktionen für CH₄, NMVOC und PM keine nennenswerten Emissions- und Energieverbrauchsreduktionen auftreten.

Im Szenario *Mindestmaßsanierer 9* treten durch die vollständige Sanierung der Gebäudehülle von zur Sanierung anstehenden Gebäuden und durch den Austausch der Wärmeversorgungsapakete Reduktionen von End- und Primärenergieverbrauch sowie Emissionen an NO_x, SO₂ und CO₂ inkl./exkl. Biomasse von 29-35% auf. Höhere Emissionsreduktionen ergeben sich mit 63-69% für CH₄, NMVOC und PM. Durch die Verschärfung der Mindestanforderungen können alle Reduktionen gemäß dem Szenario *Mindestmaßsanierer 11* um 4-9%²¹⁶ erhöht werden. Das ökonomische Reduktionspotenzial gemäß *KW11* wird allerdings bspw. bei NO_x und SO₂ wegen der unterstellten Trägheit bez. Energieträgerwechseln um 6% und 27% (der Emissionen im Jahr 2006) verfehlt, im Vergleich zum Szenario *Staatssicht 11* sogar um 33% und 39%.

Im Szenario *Ökonom I 11* wird von den Gebäudeeigentümern gemäß Kompromiss aus Kapitalwert und Amortisationszeit entschieden. Im Falle der Selbstnutzer gehen zudem die Kapitalverfügbarkeit und die Konformität des Maßnahmenpakets mit den Mindestanforderungen in die Entscheidung ein. In der Folge wird im Vergleich zum Szenario *KW11* aufgrund kürzerer Amortisationszeiten (aus Selbstnutzersicht) verstärkt in die Anlagentechnik sowie insbesondere auch in Holzpelletkessel investiert. Die Selbstnutzer investieren zu

²¹⁶ Prozentuale Angaben zu Änderungen oder Abweichungen von Prozentangaben werden in dieser Arbeit durchgehend *nicht* als Prozent der Prozentangabe verwendet. Stattdessen wird bspw. unter einem Anteil von 5%, der um 5% erhöht wird, ein Anteil von 10% verstanden.

dem verstärkt in die Modernisierung der Gebäudehülle, um die Konformität mit den Mindestanforderungen zu verbessern. Die Vermieter investieren dahingegen weniger in die Gebäudehülle, um die Amortisationszeit zu verkürzen. Dadurch weist das Szenario im Vergleich zum Szenario *KW11* hinsichtlich CO₂-Emissionen exkl. Biomasse sowie nicht erneuerbarem Primärenergieverbrauch größere und hinsichtlich NO_x- und PM-Emissionen kleinere Reduktionen auf. Im Szenario *Ökonom II 11*, in dem die Selbstnutzer analog entscheiden, wird dahingegen unterstellt, dass die Vermieter gemäß *Kapitalwert aus Selbstnutzersicht* entscheiden. Daher wird wieder mehr in die Gebäudehülle und (geringfügig) weniger in die Anlagentechnik investiert. In der Folge können alle Emissions- und Energieverbrauchsreduktionen um 1% bis 5% gesteigert werden.

Im Szenario *Ökomodernisierer 11 W** werden unter den Extremszenarien die höchste CO₂-Emissionsreduktion exkl. Biomasse, die höchste SO₂-Emissionsreduktion sowie die höchste fossile und gesamte Primärenergieverbrauchsreduktion erreicht. Allerdings steigen die PM- und die NO_x-Emissionen sogar um 71% und 29% an. Im Szenario *Ökomodernisierer 11* wurden dahingegen die Mindestanforderungen an die Qualität der Anlagentechnik verschärft. In der Folge wird (statt einer Erhöhung um 71%) eine Reduktion der PM-Emissionen bis 2030 um 43% erreicht, da Holzpelletkessel nicht mehr ohne Partikelabscheider eingebaut werden können. Die sonstigen Reduktionen bleiben nahezu identisch.

Die Gesamtbewertung aus Staatssicht nimmt unter den Extremszenarien vom *Mindestmaßsanierer 11* über *Ökonom II 11*, *Ökonom I 11*, *Mindestmaßsanierer 9*, *Ökomodernisierer 11* und *Ökomodernisierer 11 W** zum *Ausbesserer 11* ab. Die Szenarien *KW11* und *Staatssicht 11* führen allerdings zu noch höheren Bewertungen. Eine detaillierte Diskussion der Bewertung aus Staatssicht erfolgt in Abschnitt 7.5.

Prognoseszenarien

Die Endenergieverbrauchsreduktion ist im Szenario *Prognose Stengel 9* mit 15% deutlich geringer als im Szenario *Prognose Stieß-Schätzl 9* mit 32%. Erklärt werden kann dies durch unterschiedliche mittlere energetische Sanierungsraten der Gebäudehülle von 1,0% bzw. 1,8%, die nur durch einen größeren Anteil an Ausbesserern (bzw. Abbruchstrategien) im Szenario *Prognose Stengel 9* erklärt werden kann. In den Szenarien *Prognose Modell A* und *Prognose Modell B* resultieren Endenergieverbrauchsreduktionen von 25% bei mittleren energetischen Sanierungsraten von 1,4% für die Gebäudehülle. Damit führen die Szenarien *Prognose Stieß-Schätzl 9* und die (zumindest für die Selbstnutzer) empirisch fundierten Entscheidungsansätze in den Szenarien *Prognose Modell A* und *Prognose Modell B* im Vergleich zur im Energiekonzept der letzten Bundesregierung genannten Sanierungsrate von 1% zu einer Überschätzung der Sanierungsrate, weshalb weitere Analysen auf einer Abänderung des Szenarios *Prognose Stengel 9* basieren.

Neben den unterschiedlichen Sanierungsraten für die Gebäudehülle gibt es in den Szenarien auch strukturelle Unterschiede in der Anlagentechnik. Bspw. steigt in den Szenarien *Prognose Modell A* und *Prognose Modell B* der Anteil erneuerbarer Energien am Endenergieverbrauch bis 2030 nur auf 7%, im Szenario *Prognose Stengel 9* auf 12% und im Szenario *Prognose Stieß-Schätzl 9* auf 46%.

Ausgehend vom Szenario *Prognose Stengel 9* können die PM-Emissionsreduktionen durch die Verschärfung der Mindestanforderungen gemäß Szenario *Prognose Stengel 11* von 48% auf 62% gesteigert werden. Grund hierfür ist überwiegend, dass Holzpelletfeuerungen in diesem Szenario nur noch mit Partikelabscheider eingesetzt werden dürfen. Die sonstigen Emissions- und Energieverbrauchsreduktionen können gemäß Szenario *Prognose Stengel 11* durch die Verschärfung der Mindestanforderungen um 1-4% gesteigert werden. Durch die Ergänzung der verschärften Mindestanforderungen durch Investitionszuschüsse, die steuerliche Abzugsfähigkeit oder eine Erhö-

hung der Energiepreise können die Reduktionen gemäß den Szenarien *Prognose Stengel 11 \$\$\$*, *Prognose Stengel 11 \$\$\$ Steuer* und *Prognose Stengel 11 ###* um maximal 1% weiter erhöht werden. In all diesen Szenarien werden jedoch die ökonomischen Reduktionspotenziale gemäß Szenario *KW11* und *Staatsicht 11* teilweise beträchtlich verfehlt, bspw. mindestens um 10% bzw. 17% bei CO₂-Emissionen exkl. Biomasse, 35% bzw. 62% bei NO_x-Emissionen, 41% bzw. 53% bei SO₂-Emissionen und 12% bzw. 13% bei PM-Emissionen. Analoges gilt für die nachhaltigkeitsorientierte Gesamtbewertung aus Staatsicht, die unter den betrachteten Prognoseszenarien bei ausschließlicher Verschärfung der Mindestanforderungen gemäß Szenario *Prognose Stengel 11* ihr Maximum erreicht.

Insgesamt zeigt sich, dass die Emissions- und Energieverbrauchsreduktionen zwischen den Extremszenarien deutlich größere Schwankungen aufweisen als bei reiner Variation der umweltpolitischen Instrumente, ausgehend vom Prognoseszenario *Prognose Stengel 9*. Demnach sind ggf. Verschiebungen zwischen den Extremszenarien bzw. den von diesen repräsentierten Entscheider-typen und -strategien vielversprechend, die durch die Anpassung umweltpolitischer Instrumente an die betroffenen Akteure sowie durch in *AWOHM* nicht direkt abgebildete umweltpolitische Instrumente wie bspw. den Vollzug der Mindestanforderungen erreicht werden können.

7.4.3 Plausibilisierung

Höhe der energetischen Sanierungsrate

Die energetische Sanierungsrate der Anlagentechnik liegt für das Jahr 2007 in allen Szenarien bei 3,0%. Damit wird die von Diefenbach u. a. (2010) genannte jährliche Modernisierungsrate für die Wärmeerzeuger von 2,8% für 2005-2009 nur leicht überschätzt. Die mittlere energetische Sanierungsrate der Gebäudehülle liegt in den *AWOHM*-Szenarien *Prognose Stengel 9*, *Prognose Stengel 11* und *Prognose Stengel 11 \$\$\$* für die Jahre 2007-2030 bei 1,0%, die Sanierungsrate des Jahres 2007 bei 1,3%. Das Szenario *Prognose Stengel 9* führt

damit für das Jahr 2007 zu einer Überschätzung der Sanierungsrate von 1% gemäß Energiekonzept der Bundesregierung (Bundeskabinett 2010) um 30%, wobei die mittlere Sanierungsrate dieser entspricht. 1,3% werden allerdings auch von Kleemann & Hansen (2005) genannt. Die Sanierungsraten für Wände, oberen und unteren Gebäudeabschluss sowie Fenster liegen im Szenario *Prognose Stengel 9* für das Jahr 2007 bei 1,3%, wobei sich diese auf 0,9%-1,0% gemäß Qualitätsstufe ++, <0,1% gemäß +++ und 0,3%-0,4% gemäß ++++ aufteilen (vgl. Abschnitt 5.4.2.1 bez. der Kürzel). Das Szenario *Prognose Stengel 9* kann die von Diefenbach u. a. (2010) mit 0,25%-1,34% angegebene Spanne der bauteilspezifischen Sanierungsraten damit nicht nachbilden. Diese Schwachstelle weisen auch die empirisch fundierten Szenarien *Prognose Modell A* und *Prognose Modell B* auf, die zudem höhere und damit unplausiblere Sanierungsraten aufweisen als das Szenario *Prognose Stengel 9*. In den *AWOHM*-Prognoseszenarien werden insgesamt die Sanierungsaktivitäten bei Außenwänden und unteren Gebäudeabschlüssen im Vergleich zu Sanierungsaktivitäten bei Fenstern und oberen Gebäudeabschlüssen überschätzt.

Jährliche Investitionen und Fördervolumina

Die Investitionen in den Wohngebäudebestand belaufen sich im Szenario *Prognose Stengel 9* im Jahr 2007 auf 16,5 Mrd. € (brutto), davon 2,5 Mrd. € für die energetische Modernisierung der Wände, 0,5 Mrd. € für die oberen Gebäudeabschlüsse, 0,4 Mrd. € für die unteren Gebäudeabschlüsse, 0,5 Mrd. € für die energetische Modernisierung der Fenster und 12,7 Mrd. € für die Wärmeversorgungs Pakete, davon 7,6 Mrd. € für die Wärmeerzeuger, 0,7 Mrd. € für Energieträgerwechsel und 4,4 Mrd. € für Verrohrungswechsel. Die Investitionen in die Wärmedämmung sind damit mit 3,3 Mrd. € um 65% höher als diejenigen des Jahres 2004 gemäß Heinze GmbH (2005), was ggf. auf unterschiedliche Bezugsjahre, Systemgrenzen und die Überschätzung der Wärmedämmfähigkeit an den Außenwänden zurückgeführt werden kann. Die Investitionen in die Wärmeerzeuger unterschreiten nur um 5% diejenigen in die An-

lagentechnik im Jahr 2004 gemäß Heinze GmbH (2005) und sind somit plausibel. Im Szenario *Prognose Stengel 11* betragen die Förderausgaben im Jahr 2007 1,1 Mrd. € für die Gebäudehülle und 1,0 Mrd. € für die Anlagentechnik. Bei Förderung gemäß entsprechen diese bei denselben Maßnahmenpaketen Förderausgaben von 1,4 Mrd. €. Diese übersteigen die 1,05 Mrd. € (Matthes u. a. 2009) an Finanzmitteln des Bundes für das CO₂-Gebäudesanierungsprogramm und das Marktanreizprogramm „Erneuerbare Energien“ im Jahr 2007 um 33%. Diese Überschätzung kann durch eine höhere Sanierungstätigkeit in *AWOHM*, durch die Nichtinanspruchnahme von Förderprogrammen in der Realität und durch die Nichtabbildung von (in der Realität) alternativ in Anspruch genommenen Förderprogrammen erklärt werden. Da die Neubauinvestitionen ausschließlich von den Mindestanforderungen abhängen, wurden diese bereits bei der Plausibilisierung der ökonomischen Potenziale in Abschnitt 7.3.3 diskutiert.

Energieverbrauch und Emissionen

Die Endenergieverbrauchsreduktion für Raumwärme und Warmwasser von 2006 bis 2030 im Szenario *Prognose Stengel 11* ist mit 19% konsistent mit dem von Matthes u. a. (2009) für ein konservatives „Mit-Maßnahmen-Szenario“ angegebenen Wert von 20%. Gleiches gilt für die Emissionen an CO₂ exkl. Biomasse mit einer Reduktion um 26% in *AWOHM* im Vergleich zu einer Reduktion um 25% gemäß Matthes u. a. (2009) von 2005 bis 2030. Bei den CH₄-Emissionen wird allerdings in *AWOHM*, das detailliertere Emissionsfaktoren verwendet, eine CH₄-Emissionsreduktion von 55% berechnet, die einem Anstieg um 3% gemäß Matthes u. a. (2009) gegenübersteht.

Behnke (2011) geht von einem Rückgang der PM_{2,5}-Emissionen von 2006 bis 2025 um ca. 20-30% aus. Struschka u. a. (2008) prognostizierten für 2005-2020 für die Emissionen des Haushalts-, Gewerbe-, Handels- und Dienstleistungssektors einen Rückgang von 18% für NO_x, 85% für SO₂, 30% für VOC und

30% für PM. Für 2006-2020 werden im Szenario *Prognose Stengel 9* Emissionsreduktionen von 2% für NO_x, 20% für SO₂, 39% für VOC und 38% für PM geschätzt. Bei NO_x, VOC und PM liegen die Abweichungen bei maximal 16% (bezogen auf 2005 bzw. 2006). Die Abweichung von 65% bei SO₂ ist darauf zurückzuführen, dass Struschka u. a. (2008) annehmen, dass 2020 ausschließlich schwefelarmes Heizöl verwendet wird und die Verwendung von schwefelarmem Heizöl in *AWOHM* nicht berücksichtigt wird.

7.4.4 Zielgruppenadaption umweltpolitischer Instrumente

Für die Zielgruppenadaption umweltpolitischer Instrumente gemäß dem in Abschnitt 6.2.4 beschriebenen auf einer Clusteranalyse basierenden Ansatz werden die Szenarien *Staatssicht MA* und *KW11 MA* verwendet, die sich von den Szenarien *Staatssicht 11* und *KW11* durch Deaktivierung der Module Haushaltsdynamik, Neubau und Abbruch unterscheiden. Somit können Aussagen in Hinsicht auf die Charakteristika von Haushalten und Gebäuden im Jahr 2006 getroffen werden. Diese weisen im Vergleich zu den durch die Module Haushaltsdynamik, Neubau und Abbruch veränderten Charakteristika kleinere Unsicherheiten auf.

Abbildung 45 und Abbildung 46 zeigen für selbstnutzende Eigentümer und Mieter (und damit implizit Vermieter) das auf eins normierte Heterogenitätsmaß – die Summe der Fehlerquadratsummen innerhalb von Clustern – in Abhängigkeit von der Clusteranzahl. Anhand des Ellbogenkriteriums wird im Folgenden jeweils die Clusteranzahl sieben für selbstnutzende Eigentümer und Mieter gewählt.²¹⁷

²¹⁷ Die abgeleiteten Ergebnisse waren trotz des nicht-deterministischen Fusionierungsalgorithmus strukturell reproduzierbar und die Cluster inhaltlich interpretierbar. Da somit aus anwendungsorientierter Sicht verwertbare Ergebnisse resultierten, wurde auf weitere Stabilitäts- und Validitätsprüfungen verzichtet.

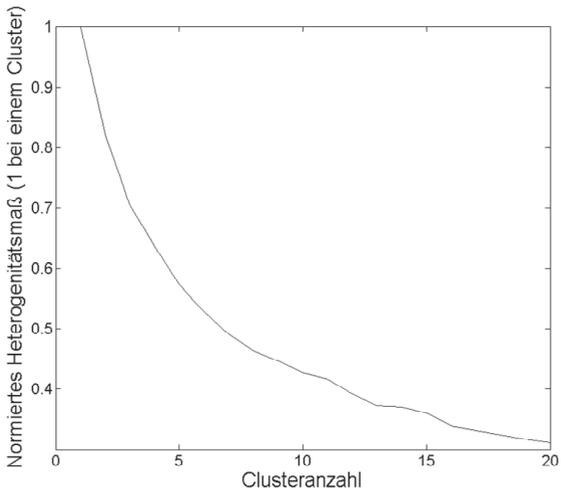


Abbildung 45: Normiertes Heterogenitätsmaß (Summe der Fehlerquadratsummen innerhalb von Clustern) in Abhängigkeit von der Clusteranzahl bei der Zielgruppen-adaption umweltpolitischer Instrumente für Selbstnutzer

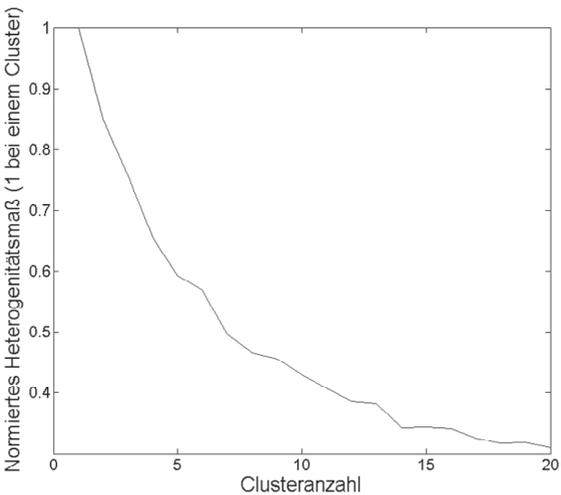


Abbildung 46: Normiertes Heterogenitätsmaß (Summe der Fehlerquadratsummen innerhalb von Clustern) in Abhängigkeit von der Clusteranzahl bei der Zielgruppen-adaption umweltpolitischer Instrumente für (Ver-)Mieter

7.4.4.1 Selbstnutzende Eigentümer

Tabelle 125 zeigt die Variablenmittelwerte der sich für selbstnutzende Eigentümer ergebenden sieben Haushaltscluster. Die Cluster sind nach steigendem (mittlerem) Haushaltsnettoeinkommen sortiert.

Tabelle 125: Variablenmittelwerte der Haushaltscluster selbstnutzender Eigentümer bei der Clusteranalyse zur Zielgruppenadaption umweltpolitischer Instrumente bei einer Clusteranzahl von sieben; *: energiebedingte Mehrinvestition in die Gebäudehülle und Gesamtinvestition in das Wärmeversorgungspaket

Variablenkategorie	Variable	Cluster (sortiert nach steigendem Haushaltsnettoeinkommen)						
		A	B	C	D	E	F	G
Gebäudeeigentümer/-bewohner	Haushaltsnettoeinkommen [€/ (Monat Person)]	127	1.013	1.100	1.112	1.213	1.726	9.128
	Grenzsteuersatz [-]	0%	30%	27%	29%	31%	37%	43%
	Alter des Haushaltsvorstands [a]	56	41	71	53	58	52	55
	Bildungsgrad des Haushaltsvorstands [-]	4	4	3	5	4	7	6
Gebäude	Investition* [€]	12.003	7.849	9.242	46.012	21.671	9.795	15.587
	Notwendige Förderung [€]	613	312	462	655	2.017	381	607
Umweltverbesserungspotenzial	CO ₂ -Vermeidung [t/(Haushalt a)]	2	1	1	8	5	1	3
Abgeleitete Ergebnisse	Clustergröße gemäß Haushaltsanzahl [-]	10%	25%	23%	6%	14%	21%	1%
	Clustergröße gemäß CO ₂ -Vermeidung [-]	9%	11%	13%	22%	30%	13%	1%
	Investition pro Haushaltsnettoeinkommen [€/ (€/ (Person Monat))]	94	8	8	41	18	6	2
	Notwendige Förderung pro Investition [-]	5%	4%	5%	1%	9%	4%	4%

Cluster E (*Potenzialreichste*²¹⁸) umfasst mit nur 14% der selbstnutzenden Eigentümer 30% der CO₂-Vermeidung – gemessen anhand der CO₂-Emissionsdifferenz für 2006 und 2030. Die Kombination eines moderaten Haushaltsnettoeinkommens mit der im Vergleich der Clustermittelwerte zweithöchsten Investition führt zu einem im Vergleich mit anderen Clustern hohen Verhältnis

²¹⁸ Nicht alle Cluster- bzw. Zielgruppennamen beziehen sich auf dasselbe Merkmal. Stattdessen werden jeweils hervorstechende Merkmale bzw. Merkmalsmittelwerte für die Namensgebung herangezogen, um die Lesbarkeit im Vergleich zu den Bezeichnungen „Cluster A“ etc. zu verbessern. Die Namen weisen daher keine hinreichende Trennschärfe für eine eindeutige Zuordnung eines Haushalts zu einem Cluster auf, für die das bei der Clusteranalyse verwendete Proximitätsmaß herangezogen werden muss (vgl. Abschnitt 6.2). Mit diesem wird die Distanz eines Haushalts zu dem Schwerpunkt eines Clusters unter Berücksichtigung aller für die Clusteranalyse herangezogenen Merkmale quantifiziert.

von Investition zu Haushaltsnettoeinkommen und damit ggf. zu Liquiditätsproblemen. Die Investitionen umfassen hierbei nur die energiebedingte Mehrinvestition in die Gebäudehülle und die Gesamtinvestition in das Wärmeversorgungspaket²¹⁹, sodass die Problematik durch das Hinzukommen nichtenergiebedingter Investitionen in die Gebäudehülle noch verstärkt wird. Sowohl absolut als auch in Prozent der Investitionssumme ausgedrückt ist die Fördersumme von 2.017 € die höchste aller Cluster. Wird diese Fördersumme ggf. im Rahmen zinsvergünstigter Darlehen bereitgestellt, so kann auch die etwaige Liquiditätsproblematik dieses Clusters reduziert werden. Das Alter von 58 Jahren ist kein Ausschlusskriterium für entsprechende Kredite für energetische Modernisierungen. Auch die mit der Investition verbundene Amortisationsdauer kann bei dieser Altersklasse durchaus innerhalb des Planungshorizontes bzw. der Restlebenserwartung der Entscheider liegen. Würde die Förderung durch die (vollständige) Absetzbarkeit der Investition vom zu versteuernden Einkommen erfolgen, so würden die Gebäudeeigentümer bei einem Grenzsteuersatz von 31% und einer notwendigen Förderung von 9% überfördert. Zudem wäre die Liquiditätsproblematik bei diesem Förderansatz nicht gelöst.

Cluster D (Umweltsünder) erfordert mit 46.012 € die im Vergleich der Clustermittelwerte höchsten Investitionen. Er weist die mit 8 t/a größte (potenzielle) CO₂-Vermeidung pro Haushalt auf, sodass er trotz eines Anteils von nur 6% an allen Selbstnutzerhaushalten 22% Anteil am gesamten CO₂-Vermeidungspotenzial der Selbstnutzer hat. Aufgrund des relativ niedrigen Haushaltsnettoeinkommens und der im Vergleich der Clustermittelwerte hohen Investition ist bei diesem Cluster mit kritischen Liquiditätshemmnissen zu rechnen. Insbesondere das im Vergleich zur Investition niedrige Haushaltsnettoeinkommen kann hierbei die Kreditwürdigkeit belasten, sodass die Gewährung von Förderungen ggf. mit Instrumenten zum Risikotransfer kombiniert werden müssten.

²¹⁹ Vgl. Abschnitt 5.4.3.2 (Ö2a) bez. Gesamt- und Mehrinvestition.

Cluster C (*Rentner*) umfasst bei einem (mittleren) Alter von 71 Jahren die im Vergleich der Clustermittelwerte ältesten Haushalte. Trotz unterdurchschnittlicher CO₂-Vermeidung pro Haushalt liegt der Anteil des Clusters an der CO₂-Vermeidung aufgrund seines Anteils von 23% an allen Selbstnutzerhaushalten bei 13%. Die Amortisationsdauer energetischer Modernisierungen kann oftmals länger sein als der Planungshorizont bzw. die Restlebenserwartung der Eigentümer. Daher könnten die umweltpolitischen Instrumente direkt auf die Folgeeigentümer bzw. den Eigentumswechsel abgestimmt werden. Da die Investitionen mit durchschnittlich 9.242 € im Vergleich der Clustermittelwerte niedrig sind, kann alternativ auch durch Förderungen die Mobilisierung der „Alt“-Eigentümer trotz deren hohen Alters angestrebt werden. In diesem Falle hätten Zuschüsse den Vorteil, dass sie dem Eigentümer unmittelbar zufließen und somit der Planungshorizont weniger in den Fokus rückt. Zudem könnten die Eigentümer bzw. die Banken einer Kreditaufnahme altersbedingt kritisch gegenüberstehen. In beiden Fällen könnten entsprechende Informationskampagnen – entweder angepasst an die voraussichtlich jüngeren Eigenheimkäufer oder die älteren „Alt“-Eigentümer – die Ziele unterstützen.

Cluster G (*Gutverdiener*) ist unter den mengenmäßig relevanten Clustern derjenige mit dem höchsten (durchschnittlichen) Haushaltsnettoeinkommen und Grenzsteuersatz sowie dem zweithöchsten (mittleren) Bildungsgrad. Das für die Investitionshöhe von 15.587 € hohe Haushaltsnettoeinkommen führt zum niedrigsten Verhältnis von Investition zu Haushaltsnettoeinkommen, sodass keine oder geringe Liquiditätsprobleme zu erwarten sind. Da auch das Alter der Haushaltsvorstände kein Hemmnis darstellt, erscheint eine Mischung aus Mindestanforderungen, Förderinstrumenten und Informationskampagnen für Besserverdienende geeignet, um dieses Potenzial zu nutzen. Das Instrument der (vollständigen) steuerlichen Abzugsfähigkeit würde für diesen Cluster bei einer notwendigen Förderung von 4% und einem Grenzsteuersatz von 43% zu einer massiven Überförderung führen. Hinsichtlich des Anteils am CO₂-Vermeidungspotenzial ist der Cluster allerdings mit 1% der Unbedeutendste.

Cluster B (Jüngere) umfasst die mit einem (mittleren) Alter von 41 Jahren im Vergleich der Clustermittelwerte jüngsten Selbstnutzer. Diese stellen 25% der selbstnutzenden Haushalte dar. Sie weisen allerdings eine unterdurchschnittliche (potenzielle) CO₂-Vermeidung auf. Dies kann dadurch erklärt werden, dass sie Wohneigentum jüngeren Baualters bewohnen. Da dieser Cluster hinsichtlich Investitionshöhe und potenziellem Planungshorizont kaum Hemmnisse und allenfalls Liquiditätsprobleme aufweist, sollte sein CO₂-Vermeidungspotenzial bei entsprechender Kreditbereitstellung und Informationspolitik ausschöpfbar sein.

Cluster F (Akademiker) umfasst im Vergleich der Clustermittelwerte die Haushalte mit dem höchsten (mittleren) Bildungsgrad, dem zweithöchsten (mittleren) Haushaltsnettoeinkommen und dem zweitniedrigsten (mittleren) Alter. Es sind damit weder altersbedingte noch liquiditätsbedingte Hemmnisse zu erwarten. Trotz unterdurchschnittlicher CO₂-Vermeidung pro Haushalt liegt der Anteil des Clusters an der CO₂-Vermeidung aufgrund seines Anteils von 21% an allen Selbstnutzerhaushalten bei 13%.

Cluster A (Wenigverdiener) sticht durch das im Vergleich der Clustermittelwerte niedrigste (mittlere) Haushaltsnettoeinkommen hervor, welches allerdings auch durch die Datenlage begründet sein kann. Der Cluster hat einen Anteil von 9% am gesamten CO₂-Vermeidungspotenzial der Selbstnutzer. Es muss davon ausgegangen werden, dass diese Haushalte die notwendige Investition von 12.003 € nicht tätigen können. Ggf. wäre *Contracting* eine Möglichkeit, dieses Hemmnis zu umgehen.

7.4.4.2 Mieter

Tabelle 126 fasst die sich für Mieter ergebenden und nach steigendem Haushaltsnettoeinkommen sortierten sieben Haushaltscluster zusammen. Die Vermieter können über diese Cluster nur indirekt berücksichtigt werden.

Tabelle 126: Variablenmittelwerte der Haushaltscluster von Mietern bei der Clusteranalyse zur Zielgruppenadaptation umweltpolitischer Instrumente bei einer Clusteranzahl von sieben; *: energiebedingte Mehrinvestition in die Gebäudehülle und Gesamtinvestition in das Wärmeversorgungspaket

Variablenkategorie	Variable	Cluster (sortiert nach steigendem Haushaltsnettoeinkommen)						
		A	B	C	D	E	F	G
Gebäudeeigentümer/-bewohner	Haushaltsnettoeinkommen [€/ (Monat Person)]	219	901	1.005	1.014	1.042	1.231	3.367
	Grenzsteuersatz [-]	0%	26%	25%	28%	26%	31%	42%
	Alter des Haushaltsvorstands [a]	48	37	46	53	71	47	49
	Bildungsgrad des Haushaltsvorstands [-]	4	4	4	4	3	6	6
Gebäude	Investition* [€]	8.567	7.151	108.971	22.041	7.654	8.023	11.217
	Notwendige Förderung [€]	338	263	3.572	1.157	299	274	447
Umweltverbesserungspotenzial	CO ₂ -Vermeidung [t/(Haushalt a)]	1	1	1	5	1	1	1
Abgeleitete Ergebnisse	Clustergröße gemäß Haushaltsanzahl [-]	13%	30%	2%	11%	26%	14%	4%
	Clustergröße gemäß CO ₂ -Vermeidung [-]	9%	14%	2%	46%	15%	9%	5%
	Investition pro Haushaltsnettoeinkommen [€/ (€/ (Person Monat))]	39	8	108	22	7	7	3
	Notwendige Förderung pro Investition [-]	4%	4%	3%	5%	4%	3%	4%

Cluster D (*Potenzialreichste*²²⁰) weist bei einer Clustergröße gemäß Haushaltsanzahl von 11% und gemäß CO₂-Vermeidung von 46% eine stark überdurchschnittliche (potenzielle) CO₂-Emissionsreduktion auf. Daher sind mit durchschnittlich 22.041 € im Vergleich zu anderen Clustern hohe Investitionen je Haushalt bzw. Wohneinheit notwendig. Die notwendige Förderung pro Investition liegt bei 5%, dem Maximum aller Mietercluster, sodass in diesem potenzialreichsten Cluster auch der stärkste Fördereingriff notwendig ist. Durch zinsvergünstigte Kredite könnte ggf. sichergestellt werden, dass die Vermieter über die notwendige Liquidität verfügen. Für eine belastbare Einschätzung sind allerdings weitere Informationen über die Vermieter notwendig, über die in *AWOHM* keine detaillierten Informationen vorliegen. Auf der Mieterseite entspräche eine 11%-Umlage der Investition einer Kaltmietenerhöhung von 202 €/Monat bzw. 191 €/Monat nach Abzug der Förderung. Bei den Wärmeversorgungspaketen enthält die Investition allerdings die Gesamtinvestition²²¹,

²²⁰ Vgl. Fußnote 218 bez. der verwendeten Namen.

²²¹ Vgl. Abschnitt 5.4.3.2 (Ö2a) bez. Gesamt- und Mehrinvestition.

von der nur der Modernisierungsanteil umlagefähig ist. Die Mieter des Clusters haben im Durchschnitt ein Alter von 53 Jahren und ein Haushaltsnettoeinkommen von 1.014 €/ (Monat Person). Eine geeignete Informationspolitik könnte darauf abzielen, die Akzeptanz dieser Mietergruppe gegenüber Kaltmietenerhöhungen zu erhöhen, sofern diesen entsprechende Energiekosteneinsparungen gegenüberstehen. Ggf. wären auch Konzepte wie Warmmieten oder Teilwarmmieten geeignet. Eine Analyse der finanziellen Belastungen, d. h. eine Gegenüberstellung von Kaltmietenerhöhung und Energiekostenreduktion, erfolgt im folgenden Abschnitt (7.4.5).

Cluster B (Jüngere) umfasst im Vergleich der Clustermittelwerte mit einem Alter von 37 Jahren die jüngsten Mieter, die das zweitniedrigste Haushaltsnettoeinkommen aufweisen. Der Cluster ist zwar gemäß Haushaltsanzahl mit 30% der größte, hat aber nur einen Anteil von 14% an der CO₂-Vermeidung, da die CO₂-Vermeidung pro Haushalt stark unterdurchschnittlich ist. Aufgrund der mit 7.151 € niedrigsten durchschnittlichen Investition fiel eine 11%-Umlage moderat aus. Ggf. ist aufgrund des niedrigen Alters mit erhöhten Wohnungswechselraten zu rechnen, sodass bei steigenden Energiepreisen insbesondere die „Alt“-Bewohner in den ersten Jahren nach der Modernisierung erhöhte Ausgaben zu tragen hätten, denen auszugsbedingt keine niedrigeren in den Folgejahren gegenüberstünden. Eine sukzessive steigende, (im Vergleich zum nicht modernisierten Zustand) warmmietenneutrale Kaltmietenerhöhung könnte diese Problematik beheben.

Cluster E (Rentner) umfasst 26% der Mieterhaushalte und (unterdurchschnittliche) 15% der CO₂-Vermeidung. Obwohl der Cluster im Vergleich der Clustermittelwerte mit einem Alter von 71 Jahren mit Abstand der älteste Cluster ist, kann aufgrund der mit 7.654 € niedrigen Investition von geringen Akzeptanzproblemen ausgegangen werden. Eine sukzessive steigende, warmmietenneutrale Kaltmietenerhöhung könnte aber auch für diesen Cluster vorteilhaft sein, da in den ersten Jahren ggf. keine Warmmietenneutralität erreichbar ist und die Haushalte aufgrund ihrer niedrigen Restlebenserwartung die Phase

mit (im Vergleich zur Unterlassungsalternative) sinkenden Warmmieten ggf. nicht mehr erleben.

Cluster G (*Bestverdiener*) umfasst bei einem mittleren Alter von 49 Jahren im Vergleich der Clustermittelwerte die Mieterhaushalte mit dem höchsten Haushaltsnettoeinkommen und dem zweithöchsten Bildungsgrad (aufgrund der Rundung nicht erkennbar). Bei gleichzeitig mäßigen Investitionen von 11.217 € ist mit geringen Hemmnissen auf Mieterseite zu rechnen. Bei einer Clustergröße von 4% gemäß Haushaltsanzahl sind die CO₂-Vermeidungen mit 5% leicht überdurchschnittlich, der Cluster insgesamt aber von untergeordneter Bedeutung.

Cluster A (*Wenigverdiener*) umfasst die Haushalte mit dem im Vergleich der Clustermittelwerte niedrigsten Haushaltsnettoeinkommen, wobei Fehler in der Datengrundlage nicht ausgeschlossen werden können. Die Haushalte sind vermutlich überwiegend Bezieher von Wohngeld. Um die Ausnutzung der trotz leichter Unterdurchschnittlichkeit 9% umfassenden (potenziellen) CO₂-Vermeidung zu unterstützen, sind ggf. Anpassungen von Regelungen zum Wohngeld hinsichtlich der Zulässigkeit von höheren Kaltmieten bei niedrigeren warmen Nebenkosten denkbar.

Cluster C (*potenzielle Umrüster*) erfordert mit 108.971 € im Vergleich der Clustermittelwerte die höchste Investition mit einer Förderung von nur 3%. Die hohe Investition kann ggf. auf einen Wechsel zu einer Zentralheizung ggf. kombiniert mit einem Energieträgerwechsel und einer Modernisierung der Gebäudehülle zurückgeführt werden. Der Cluster ist hinsichtlich der Anzahl betroffener Haushalte und des CO₂-Vermeidungspotenzials derjenige mit der geringsten Bedeutung. Für die Identifizierung evtl. geeigneter Förderspezifikationen sollten die Gebäude und die eingesetzten Maßnahmenpakete detaillierter betrachtet werden. Insbesondere bei diesem Cluster könnte jedoch auch der Gebäudeabbruch mit etwaigem Ersatzneubau eine vielversprechende Option darstellen. Ohne Förderung entspräche eine 11%-Umlage der Investition 999 €/Monat, die bei einem Monatseinkommen von im Mittel 1.005 €/(Monat

Person) von den Mietern nicht getragen werden kann. Die Investition beinhaltet allerdings einen ggf. beträchtlichen Nichtmodernisierungsanteil, der nicht umlagefähig ist.

Cluster F (*Gutverdiener*) umfasst 14% der Haushalte und (unterdurchschnittliche) 9% des CO₂-Vermeidungspotenzials in Mietwohnungen. Aufgrund einer mit 8.023 € niedrigen Investition und dem im Vergleich der Clustermittelwerte zweithöchsten Haushaltsnettoeinkommen sollten entsprechende Mieterhöhungen durchsetzbar sein.

Die Cluster A, B, C, E, F und G erfordern allesamt eine gleichmäßige Förderung von 3% bis 4%, sodass hier keine Differenzierung nach den identifizierten Clustern notwendig erscheint. Bei dem potenzialreichsten Cluster D wäre allerdings eine mit 5% höhere Förderung anzustreben. Bedingt durch die Datenglage konzentrierten sich die Analyse und die Argumentation auf die Mieter und die Gebäude. Lügen weitere Informationen über die Vermieter vor, so könnten die umweltpolitischen Instrumente besser an die eigentlichen Entscheider angepasst werden.

7.4.5 Identifizierung von „sozialen Brennpunkten“

Die Identifizierung „sozialer Brennpunkte“ erfolgt gemäß dem in Abschnitt 6.2.5 beschriebenen auf einer Clusteranalyse basierenden Ansatz. Dabei wird, wie im vorigen Abschnitt, das Hilfsszenario *Staatssicht 11 MA* hinsichtlich drohender „sozialer Brennpunkte“ analysiert, da das Ausgangsszenario *Staatssicht 11* unter den ausschöpfbaren Potenzialszenarien die höchste Bewertung aus Staatssicht aufweist. Durch die Wahl des Szenarios wird die Situation analysiert, in der die aus Staatssicht anzustrebenden Maßnahmenpakete ohne Förderung umgesetzt werden. Im Hilfsszenario *Staatssicht 11 MA* sind die Module Haushaltsdynamik, Neubau und Abbruch deaktiviert. Somit können wiederum Aussagen in Hinsicht auf die Charakteristika von Haushalten und Gebäuden im Jahr 2006 getroffen werden, die im Vergleich zu den durch die Module Haus-

haltsdynamik, Neubau und Abbruch veränderten Charakteristika kleinere Unsicherheiten aufweisen.

Anhand des Ellbogenkriteriums wird im Folgenden die Clusteranzahl fünf für selbstnutzende Eigentümer und sechs für Mieter gewählt. Vgl. hierzu Abbildung 53 und Abbildung 54 in Anhang A.3. Diese zeigen für selbstnutzende Eigentümer und Mieter das auf eins normierte Heterogenitätsmaß (Summe der Fehlerquadratsummen innerhalb von Clustern) in Abhängigkeit von der Clusteranzahl.²²²

7.4.5.1 Selbstnutzende Eigentümer

Tabelle 127 zeigt die Variablenmittelwerte der sich für selbstnutzende Eigentümer ergebenden fünf Haushaltscluster. Die Cluster sind nach den Haushaltsnettoeinkommen sortiert. Durch die Investitionen in die Modernisierung der Gebäudehülle und das Wärmeversorgungspaket verändert sich das Haushaltsnettoeinkommen abzüglich Energiekosten und Abnutzung der Investitionen. Die Abnutzung der Investition wurde dabei annuitätisch, und als Energiepreis derjenige des Sanierungsjahres angesetzt, wobei im Szenario *Staatsicht 11 MA* allgemein von einem jährlichen Energiepreisanstieg um 3% ausgegangen wird. Demnach wird die Situation direkt nach der Sanierung betrachtet bzw. eine Situation, in der die Energiepreise ab dem Sanierungszeitpunkt entgegen den Szenarioannahmen konstant bleiben. Selbst bei diesen Annahmen sinkt bei drei der neun Cluster das verbleibende Haushaltsnettoeinkommen nicht, sondern verändert sich jeweils um 0 bis 6 €/ (Monat Person). Die Investition entspricht bei diesen Clustern, die 73% der Selbstnutzerhaushalte umfassen, zwischen 2 und 8 monatlichen Haushaltsnettoeinkommen. Der mit einem mittleren Alter von 70 Jahren älteste Cluster C muss dabei um mindestens 60% höhere Investitionen pro Haushaltsnettoeinkommen tätigen als die anderen

²²² Die abgeleiteten Ergebnisse waren trotz des nicht-deterministischen Fusionsalgorithmus strukturell reproduzierbar und die Cluster inhaltlich interpretierbar. Da somit aus anwendungsorientierter Sicht verwertbare Ergebnisse resultierten, wurde auf weitere Stabilitäts- und Validitätsprüfungen verzichtet.

Cluster. Können die Investitionen, wie angenommen, annuitätisch zu einem Zinssatz von 5% über die erwartete Lebensdauer finanziert werden, so ergibt sich bei ab Sanierungszeitpunkt konstanten Energiepreisen eine finanzielle Besserstellung der Haushalte dieser drei Cluster durch die energetische Modernisierung. Bei steigenden Energiepreisen werden die Haushalte zwar insgesamt schlechtergestellt, ihre Besserstellung im Vergleich zur Situation ohne energetische Modernisierung fällt dann aber stärker aus.

Tabelle 127: Variablenmittelwerte der Haushaltscluster von Selbstnutzern bei der Clusteranalyse zur Identifizierung „sozialer Brennpunkte“ bei einer Clusteranzahl von fünf im Szenario *Staatssicht 11 MA*; *: energiebedingte Mehrinvestition in die Gebäudehülle und Gesamtinvestition in das Wärmeversorgungspaket²²³; **: bei Energiepreisen im Jahr der Sanierung

Cluster	Haushaltsgröße [Pers.]	Alter des Haushaltsvorstands [Jahre]	Investition* pro Haushaltsnettoeinkommen [€/((€/Monat)]	Haushaltsnettoeinkommen [€/ (Monat Person)]	Veränderung des Haushaltsnettoeinkommens abzüglich Energiekosten** und Abnutzung der Investition* [€/ (Monat Person)]	Clustergröße gemäß Haushaltsanzahl
A	3,8	44	5	901	0	32%
B	1,3	57	68	1.039	-212	2%
C	1,7	70	8	1.178	6	40%
D	1,6	43	5	1.599	-7	24%
E	1,8	56	2	6.561	1	1%

Die zwei Cluster mit einer Verringerung des verbleibenden Einkommens – die Cluster B und D – umfassen 26% der Selbstnutzerhaushalte. Die Schlechterstellung beläuft sich bei dem 24% der Selbstnutzerhaushalte umfassenden Cluster D auf nur 7 €/ (Monat Person), was weniger als 0,5% des Haushaltsnettoeinkommens entspricht. Als kritisch kann nur der Cluster B eingestuft werden, welcher nur 2% der Selbstnutzerhaushalte umfasst. Bei diesem resultiert ein um 212 €/ (Monat Person) verringertes verbleibendes Haushaltsnettoeinkommen. Zudem ist die Finanzierungsannahme kritisch zu hinterfragen, da die Investition 68 monatlichen Haushaltsnettoeinkommen entspricht. Die hohen Investitionen sind maßgeblich auf die angenommene Umstellung auf eine zentrale Wärmebereitstellung zurückzuführen, die in der Realität in diesen Fällen wohl nicht umgesetzt würde.

²²³ Vgl. Abschnitt 5.4.3.2 (Ö2a) bez. Gesamt- und Mehrinvestition.

Im Szenario *Staatssicht 11 MA* wurde eine erwartete Lebensdauer von 40 Jahren für die modernisierte Gebäudehülle angesetzt, auf Basis derer auch die Abnutzung der Investition berechnet wurde. Wird diese erwartete Lebensdauer auf 20 Jahre reduziert, so resultiert nach Tabelle 128 zwar für alle fünf Cluster ein modernisierungsbedingte Reduktion des verbleibenden Haushaltsnettoeinkommens, aber es ergibt sich wiederum nur ein Cluster mit deutlicher Verringerung, welcher für die Realität von untergeordneter Bedeutung ist. In den übrigen Clustern verringert sich das verbleibende Haushaltsnettoeinkommen im Mittel mäßig um 2 bis 12 €/(Monat Person) bzw. 0,1% bis 0,8% des Haushaltsnettoeinkommens.

Tabelle 128: Variablenmittelwerte der Haushaltscluster von Selbstnutzern bei der Clusteranalyse zur Identifizierung „sozialer Brennpunkte“ bei einer Clusteranzahl von fünf im Szenario *Staatssicht 11 MA* bei auf 20 Jahre verkürzter erwarteter Lebensdauer der modernisierten Gebäudehülle; *: energiebedingte Mehrinvestition in die Gebäudehülle und Gesamtinvestition in das Wärmeversorgungspaket; **: bei Energiepreisen im Jahr der Sanierung

Cluster	Haus-halts-größe [Pers.]	Alter des Haushalts-vorstands [Jahre]	Investition* pro Haushaltsnetto-einkommen [€/€/Monat]	Haushaltsnetto-einkommen [€/Monat Person]	Veränderung des Haushaltsnetto-einkommens abzüglich Energie-kosten** und Abnutzung der Investition* [€/Monat Person]	Clustergröße gemäß Haushalts-anzahl
A	3,8	44	5	901	-3	32%
B	1,3	57	66	1.049	-216	2%
C	1,7	70	8	1.177	-2	40%
D	1,6	43	5	1.599	-12	24%
E	1,8	56	2	6.559	-9	1%

Insgesamt konnten bei den Selbstnutzern zwar teilweise finanzielle Schlechterstellungen durch den angenommenen Wechsel zu einer zentralen Wärmeversorgung identifiziert werden. Auf eine übermäßige finanzielle Belastung mengenmäßig relevanter Selbstnutzergruppen durch im Szenario *Staatssicht 11 MA* realisierte Maßnahmenpakete ergeben sich jedoch keine Hinweise.

7.4.5.2 Mieter

Tabelle 129 zeigt die Variablenmittelwerte der sich für Mieter ergebenden sechs Haushaltscluster bei einer jährlichen Umlage von 11% des Modernisierungsanteils der Investition auf die Kaltmiete. Sonstige Kaltmietensteigerungen wurden nicht berücksichtigt. Die Cluster sind nach den Haushaltsnettoein-

kommen abzüglich Warmmiete vor der Sanierung bei Energiepreisen im Jahr der Sanierung sortiert. In der Analyse werden zwar Energiepreissteigerungen um 3% je Jahr bis zur jeweiligen Sanierung berücksichtigt, aber anschließend wird von konstanten Energiepreisen ausgegangen und somit ein Schwerpunkt auf die finanzielle Belastung von Mietern in dem bzw. den ersten Jahren nach der Modernisierung gelegt.

Tabelle 129: Variablenmittelwerte der Haushaltscluster von Mietern bei der Clusteranalyse zur Identifizierung „sozialer Brennpunkte“ im Szenario *Staatsicht 11 MA* bei einer Clusteranzahl von sechs und einer jährlichen Umlage von 11% der umlagefähigen Modernisierungsinvestitionen; *: bei Energiepreisen im Jahr der Sanierung

Cluster	Haushaltsgröße [Pers.]	Alter des Haushaltsvorstands [Jahre]	Modernisierungsanteil der Investition pro Kaltmiete vor Sanierung [€/(€/Monat)]	Haushaltsnettoeinkommen abzüglich Warmmiete* vor der Sanierung [€/(Monat Person)]	Veränderung des Haushaltsnettoeinkommens abzüglich Warmmiete* [€/(Monat Person)]	Clustergröße gemäß Haushaltsanzahl
A	3,6	40	21	457	-9	21%
B	1,4	35	20	588	-20	33%
C	1,5	69	21	633	-19	35%
D	1,2	49	817	734	-840	3%
E	1,4	45	18	1.983	-23	8%
F	1,4	44	18	12.546	-42	0%

Für keinen der Cluster wird unter diesen Rahmenbedingungen im ersten Jahr nach der Sanierung eine Warmmietenneutralität erreicht, sodass die Modernisierung eine Reduktion des Haushaltsnettoeinkommens abzüglich Warmmiete verursacht. Mit Ausnahme von Cluster C und D sind Haushalte von umso stärkeren Warmmietenerhöhungen betroffen, je höher ihr Haushaltsnettoeinkommen abzüglich Warmmiete vor der Sanierung war.

Der Cluster A (*Familien*²²⁴) umfasst bei einem mittleren Alter des Haushaltsvorstands von 40 Jahren und einer mittleren Haushaltsgröße von 3,6 Personen vermutlich überwiegend Familien, die durch die energetische Modernisierung im ersten Jahr nach der Sanierung im Mittel 2% ihres Haushaltsnettoeinkommens abzüglich Warmmiete verlieren. Sie umfassen 21% der Mieterhaushalte und sind daher auch mengenmäßig von Bedeutung. Diese einkommenschwachen Familien werden damit ggf. in der Zeit, in der die Kinder noch bei den Eltern wohnen, durch die energetische Modernisierung finanziell schlechter-

²²⁴ Vgl. Fußnote 218 bez. der verwendeten Namen.

gestellt. Bei steigenden Energiepreisen in den Folgejahren würden sie zwar ggf. bessergestellt als ohne energetische Modernisierung, aber dennoch zusätzlich finanziell belastet.

Die Cluster B (*Jüngere*) und C (*Rentner*) stellen überwiegend Ein- und Zweipersonenhaushalte niedrigen und hohen Alters dar. Sie umfassen 33% und 35% – insgesamt also 68% – aller Mieterhaushalte. Ihr Haushaltsnettoeinkommen abzüglich Warmmiete reduziert sich jeweils im Mittel um 3%. Auch bei steigenden Energiepreisen können die Haushalte ggf. nicht von im Vergleich zur Situation ohne energetische Modernisierung niedrigeren Warmmieten profitieren, sofern man altersbedingt eine höhere Umzugswahrscheinlichkeit bzw. Sterbewahrscheinlichkeit unterstellt.

Die Haushalte in Cluster D (*potenzielle Umrüster*) werden durch die Modernisierung um 817 €/ (Monat Kopf) schlechtergestellt. Bedingt wird diese, das Haushaltsnettoeinkommen abzüglich Warmmiete vor der Sanierung übersteigende Schlechterstellung – analog zu Cluster B bei den Selbstnutzern – durch den Wechsel zu einer zentralen Wärmebereitstellung. Da dieser Wechsel in der Realität wohl nicht umgesetzt würde und der Cluster zudem nur 3% der Mieterhaushalte umfasst, ist er von untergeordneter Bedeutung.

Bei den Haushaltsclustern E (*Gutverdiener*) und F (*Bestverdiener*), den Clustern mit den im Vergleich der Clustermittelwerte höchsten Haushaltsnettoeinkommen abzüglich Warmmiete vor der Sanierung, beträgt die modernisierungsbedingte Reduktion des Haushaltsnettoeinkommens abzüglich Warmmiete 1% bzw. 0%. Damit ist bspw. Cluster F mit 42 €/ (Monat Person) zwar von einer stärkeren absoluten Reduktion des Haushaltsnettoeinkommens abzüglich Warmmiete betroffen als die Cluster A, B, C und E, aber in der Relation zum Haushaltsnettoeinkommen abzüglich Warmmiete vor der Sanierung ist die finanzielle Belastung geringer. Hinsichtlich übermäßiger finanzieller Belastungen im Sinne „sozialer Brennpunkte“ sind Cluster E und F daher irrelevant. Bei der Analyse wurden Mittelwerte der zu den jeweiligen Clustern gehörenden Haushalte zur Argumentation herangezogen. Durch die Streuung inner-

halb der Cluster kann die finanzielle Belastung von Clusterteilmengen deutlich höher sein, als die Mittelwerte indizieren.

Tabelle 130: Variablenmittelwerte der Haushaltscluster von Mietern bei der Clusteranalyse zur Identifizierung „sozialer Brennpunkte“ im Szenario *Staatsicht 11 MA reduzierte Umlage* bei einer Clusteranzahl von sechs und einer jährlichen Umlage von 5,5% der umlagefähigen Modernisierungsinvestitionen; *: bei Energiepreisen im Jahr der Sanierung

Cluster	Haushaltsgröße [Pers.]	Alter des Haushaltsvorstands [Jahre]	Modernisierungsanteil der Investition pro Kaltmiete vor Sanierung [€/(€/Monat)]	Haushaltsnettoeinkommen abzüglich Warmmiete* vor der Sanierung [€/(Monat Person)]	Veränderung des Haushaltsnettoeinkommens abzüglich Warmmiete* [€/(Monat Person)]	Clustergröße gemäß Haushaltsanzahl
A	3,6	40	21	457	3	21%
B	1,4	35	21	589	1	33%
C	1,5	69	22	634	2	35%
D	1,2	49	824	724	-407	2%
E	1,4	44	18	1.985	2	8%
F	1,4	44	18	12.546	0	0%

Da eine 11%-Umlage die gesetzliche Obergrenze darstellt, die am Markt zumindest teilweise schwer durchsetzbar sein kann, und bei dieser für keinen Haushaltscluster im ersten Jahr nach der Sanierung Warmmietenneutralität erreicht wird, wird mit dem Szenario *Staatsicht 11 MA reduzierte Umlage* (vgl. Abschnitt 7.3.1) zudem die Situation bei einer 5,5%-Umlage analysiert. Gemäß Tabelle 130 wird mit Ausnahme des Clusters D die Warmmietenneutralität für alle Cluster erreicht. Somit kann durch eine Begrenzung der Modernisierungsumlage auf 5,5% die modernisierungsbedingte finanzielle Belastung der Mieter beseitigt werden. Vermieter würden dadurch allerdings deutlich schlechtergestellt und ihr Investitionsanreiz sänke.

7.5 Indikatorenbasierte Bewertung

Dieser Abschnitt hat einen Bezug zu folgenden (Teil-)Forschungsfragen:

- Welche Bündel umweltpolitischer Instrumente sind für den Bereich der Wärmenutzung in Wohngebäuden geeignet, um die Treibhausgas- und Luftschadstoffemissionen sowie den Primärenergieverbrauch zu reduzieren?
- Hinsichtlich welcher Teilbereiche der Nachhaltigkeitsbewertung treten Zielkonflikte auf?

In Abschnitt 7.5.1 werden ausgewählte Szenarien anhand der nachhaltigkeitsorientierten Bewertung²²⁵ aus Staatssicht (vgl. Kapitel 6) mittels aggregierter Indikatoren gegenübergestellt. Dabei werden einerseits Entscheidertypen und -strategien entsprechende Extremszenarien sowie plausible Prognoseszenarien analysiert, um Rückschlüsse auf die Ausgestaltung umweltpolitischer Instrumentenbündel ziehen zu können. Andererseits werden die Szenarien *KW11* und *Staatssicht 11* betrachtet, die aufgrund ihrer relativ guten Bewertung aus Staatssicht (vgl. Abschnitt 7.4) als Basis für die Ausgestaltung von Mindestanforderungs- und Förderpaketen herangezogen wurden. Auf aus der Bewertung resultierende Implikationen hinsichtlich der Hauptforschungsfrage wird in Abschnitt 7.5.2 eingegangen, bevor in Abschnitt 7.5.3 exemplarisch die Möglichkeit aufgezeigt wird, mit *AWOHM* die aggregierten Indikatoren detaillierter aufzuschlüsseln.

7.5.1 Aggregierte Bewertung aus Staatssicht

Die nachhaltigkeitsorientierte Bewertung aus Staatssicht wird in zwei Aggregationsebenen dargestellt. Dabei wird zunächst die Gesamtbewertung nach Dimensionen, d. h. nach Ebene 1, unterteilt. Anschließend wird jede Dimension separat anhand der Ebene-3-Indikatoren als Kompromiss zwischen Detaillierung und Übersichtlichkeit vertiefend diskutiert. Die indikatorenbasierte Bewertung dient einerseits der Darstellung der Vor- und Nachteile von Szenarien in den Bewertungsdimensionen bzw. -indikatoren im direkten Vergleich. Andererseits ermöglicht sie auch die Gesamtbewertung von Szenarien, die allerdings neben den Indikatorwerten vor der Normierung wesentlich von den Normierungsfunktionen, den Normierungsgrenzen und den Gewichtungen beeinflusst wird (vgl. Kapitel 6). Daher sind die Gesamtnutzen aus Staatssicht, bspw. 0,485 und 0,552 für die Szenarien *Ausbesserer 11* und *Mindestmaßsa-*

²²⁵ Die Nachhaltigkeitsbewertung wird durch den Betrachtungsgegenstand von *AWOHM*, d. h. den Gebäude- und Haushaltsbestand, und die mit *AWOHM* bereitstellbaren Informationen eingeschränkt, sodass jeweils nur Teilaspekte der Nachhaltigkeit bzw. ihrer Dimensionen und Kriterien abgedeckt werden (können).

nierer 11, in dieser aggregierten Form ohne weitere Betrachtung der Teilnutzen nur als exemplarische Bewertung zu interpretieren. Das Bewertungssystem kann von etwaigen Entscheidungsträgern ihren Präferenzen entsprechend angepasst werden.

Abbildung 47 zeigt für ausgewählte Szenarien die Gesamtbewertung aus Staatssicht differenziert nach Dimensionen. In den sechs Extremszenarien auf der linken Seite entscheiden jeweils alle Gebäudeeigentümer einer Eigentümerstruktur gemäß derselben Nutzenfunktion. Die Szenarien auf der rechten Seite entsprechen dahingegen Prognoseszenarien, bei denen jeder Gebäudeeigentümer in Abhängigkeit von den Gebäude- und Bewohnereigenschaften einem Entscheidertypen bzw. einer Entscheiderstrategie zugeordnet wird (vgl. Abschnitt 5.4). Hierdurch kann die Heterogenität von Entscheidern bei der Prognose berücksichtigt werden.

Die Extremszenarien sind nach steigendem Teilnutzen in der Dimension *Generationengerechtigkeit* sortiert. Beim Übergang vom Szenario *Ausbesserer 11* zum Szenario *KW11* geht der Anstieg des Teilnutzens *Generationengerechtigkeit* mit einer Erhöhung des Gesamtnutzens und der Teilnutzen *Lebensqualität* sowie *sozialer Zusammenhalt* einher. Beim Übergang zum Szenario *Mindestmaßsanierer 11* wird das Sinken der *Lebensqualität* nicht durch den weiteren Anstieg der *Generationengerechtigkeit* kompensiert, sodass bei gleichbleibendem *sozialem Zusammenhalt* ein sinkender Gesamtnutzen resultiert. Im Szenario *Staatssicht 11* kann die *Generationengerechtigkeit* weiter gesteigert werden. Dabei sinkt zwar der *soziale Zusammenhalt* leicht ab, aber sowohl *Lebensqualität* als auch Gesamtnutzen sind in diesem Szenario maximal. Die über das Szenario *Staatssicht 11* hinausgehende Erhöhung des Teilnutzens *Generationengerechtigkeit* in den Szenarien *Ökonom I 11* und *Ökomodernisierer 11* führt zu einem sinkenden Gesamtnutzen, da die Reduktionen der Teilnutzen *Lebensqualität* und *sozialer Zusammenhalt* durch die steigende *Generationengerechtigkeit* nicht kompensiert werden.

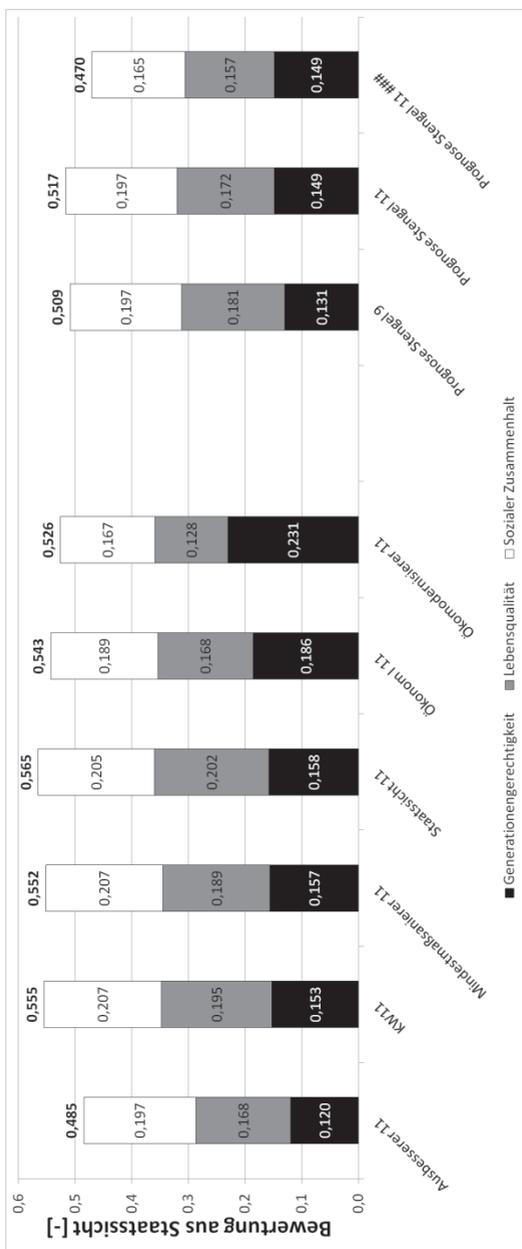


Abbildung 47: Bewertung ausgewählter Szenarien aus Staatssicht differenziert nach Ebene-1-Indikatoren

Ausgehend vom Prognoseszenario *Prognose Stengel 9*, d. h. ohne Förderung und ohne über die EnEV 2009 hinausgehende Verschärfungen der Mindestanforderungen, führt eine Verschärfung der Mindestanforderungen gemäß Szenario *Prognose Stengel 11* zu einer Erhöhung des Gesamtnutzens, die bei gleichbleibendem *sozialem Zusammenhalt* und Verschlechterung der *Lebensqualität* auf eine Erhöhung der *Generationengerechtigkeit* zurückzuführen ist. Die zusätzliche Erhöhung der Energiesteuern gemäß Szenario *Prognose Stengel 11* führt aufgrund beträchtlicher Verschlechterungen in den Dimensionen *Lebensqualität* und *sozialer Zusammenhalt* zum minimalen Gesamtnutzen unter den hier betrachteten Szenarien.

Im Folgenden werden die aggregierten Ergebnisse der drei Dimensionen auf Ebene 3 detaillierter analysiert. Die zugehörigen Teilnutzen sind in Abbildung 48, Abbildung 49 und Abbildung 50 dargestellt.

Generationengerechtigkeit

Unter den Extremszenarien steigen in der Dimension *Generationengerechtigkeit* die Teilnutzen *erneuerbare Energien* und *Energieeffizienzinvestitionen im Bestand* (inkl. Investitionen zur Nutzung erneuerbarer Energien) mit zunehmender *Generationengerechtigkeit*. Mit Ausnahme des Szenarios *Mindestmaßsanierer 11* gilt dies auch für den Teilnutzen *Verbrauch fossiler Brennstoffe* und mit Ausnahme der Szenarien *Ökonom I 11* und *Ökomodernisierer 11* für den Teilnutzen *Treibhausgasemissionen*. Die Teilnutzen *Investitionen Neubau* und *Förderbudget* sind für die betrachteten Extremszenarien identisch, da sich die Unterschiede zwischen den Szenarien auf die Sanierung von Bestandsgebäuden beschränken und in allen Szenarien keine Förderung gewährt wird. Der Teilnutzen *Energieeffizienz* ist in den Szenarien *Mindestmaßsanierer 11* und *Ökomodernisierer 11* am höchsten. Der Teilnutzen *Rohstoffeinsatz* (für die Modernisierung) ist maximal (bzw. minimal) für das Szenario *Ausbesserer 11* (bzw. *Ökomodernisierer 11*), dem Szenario mit den niedrigsten (bzw. höchsten) Investitionen.

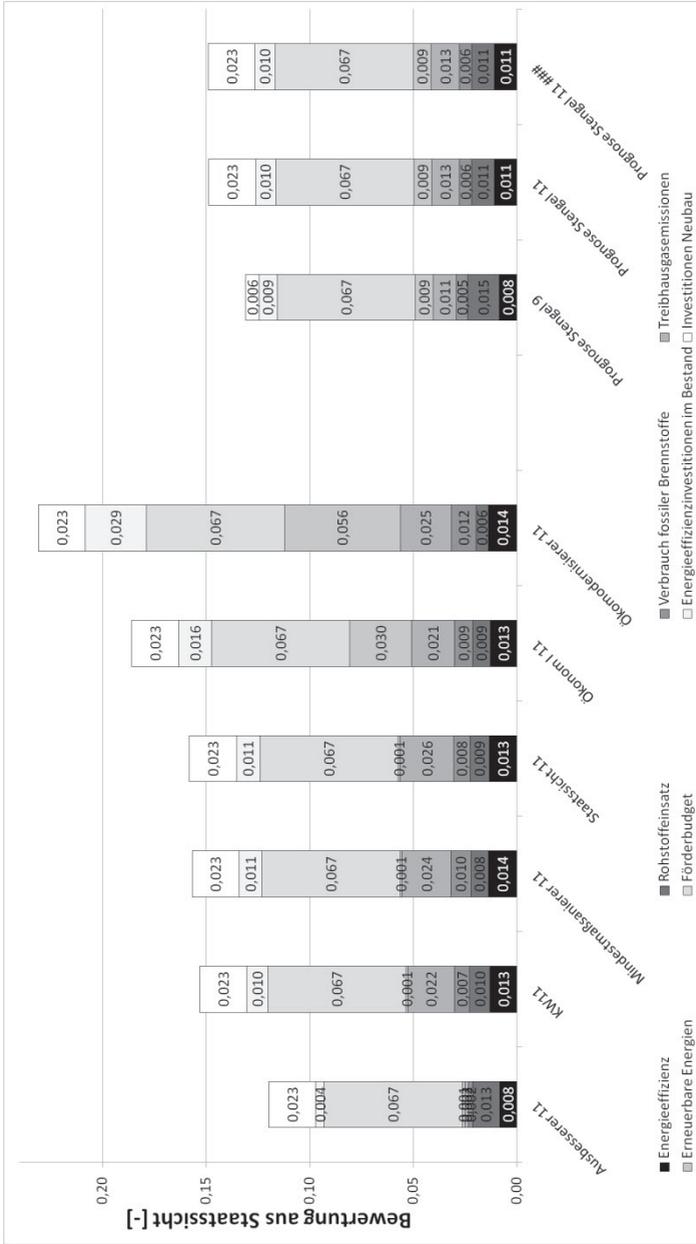


Abbildung 48: Teilnutzen ausgewählter Szenarien aus Staatssicht in der Dimension *Generationengerechtigkeit* differenziert nach Ebene-3-Indikatoren

Unter den Prognoseszenarien führt eine Verschärfung der Mindestanforderungen von Szenario *Prognose Stengel 9* zu Szenario *Prognose Stengel 11* zu einer steigenden *Generationengerechtigkeit*, die insbesondere durch höhere Investitionen in den Neubau bedingt ist. Eine zusätzliche Erhöhung der Energiesteuern gemäß Szenario *Prognose Stengel 11* hat dahingegen nur marginale Auswirkungen (gerundet dargestellt).

Lebensqualität

Unter den Extremszenarien weist das Szenario *Staatssicht 11* den größten Teilnutzen *Lebensqualität* auf, was insbesondere durch die niedrigste *Schadstoffbelastung der Luft* (d. h. den höchsten Teilnutzen *Schadstoffbelastung der Luft*) bei relativ niedriger *Investitionsbelastung im Bestand* und relativ hoher *Wirtschaftlichkeit der Maßnahmen* bedingt ist. Die größte Wirtschaftlichkeit der Maßnahmen wird gemeinsam mit relativ niedriger *Investitionsbelastung im Bestand* und niedriger *Schadstoffbelastung der Luft* in den Szenarien *KW11* und *Mindestmaßsanierer 11* erreicht (gerundet dargestellt), die damit ähnlich hohe Teilnutzen *Lebensqualität* aufweisen wie das Szenario *Staatssicht 11*. Im Szenario *Ausbesserer 11* tritt zwar die niedrigste *Investitionsbelastung im Bestand* auf, allerdings führt die höchste *Schadstoffbelastung der Luft* mit mittlerer *Wirtschaftlichkeit der Maßnahmen* zu einem relativ niedrigen Teilnutzen *Lebensqualität*. Das Szenario *Ökonom I 11* wird in jedem Ebene-3-Indikator von den Szenarien *Mindestmaßsanierer 11*, *KW11* und *Staatssicht 11* dominiert. Die Einbeziehung der Amortisationszeit in die Investitionsentscheidung führt damit zu einer erhöhten *Investitionsbelastung*, einer erhöhten *Schadstoffbelastung der Luft* und einer verminderten *Wirtschaftlichkeit der Maßnahmen*. Das Szenario *Ökomodernisierer 11* weist den niedrigsten Teilnutzen *Lebensqualität* auf, da trotz höchster *Investitionsbelastung im Bestand* die niedrigste *Wirtschaftlichkeit der Maßnahmen* und die zweithöchste *Schadstoffbelastung der Luft* resultieren. Die *Investitionsbelastung im Neubau* bleibt bei allen hier betrachteten Extremszenarien unverändert.

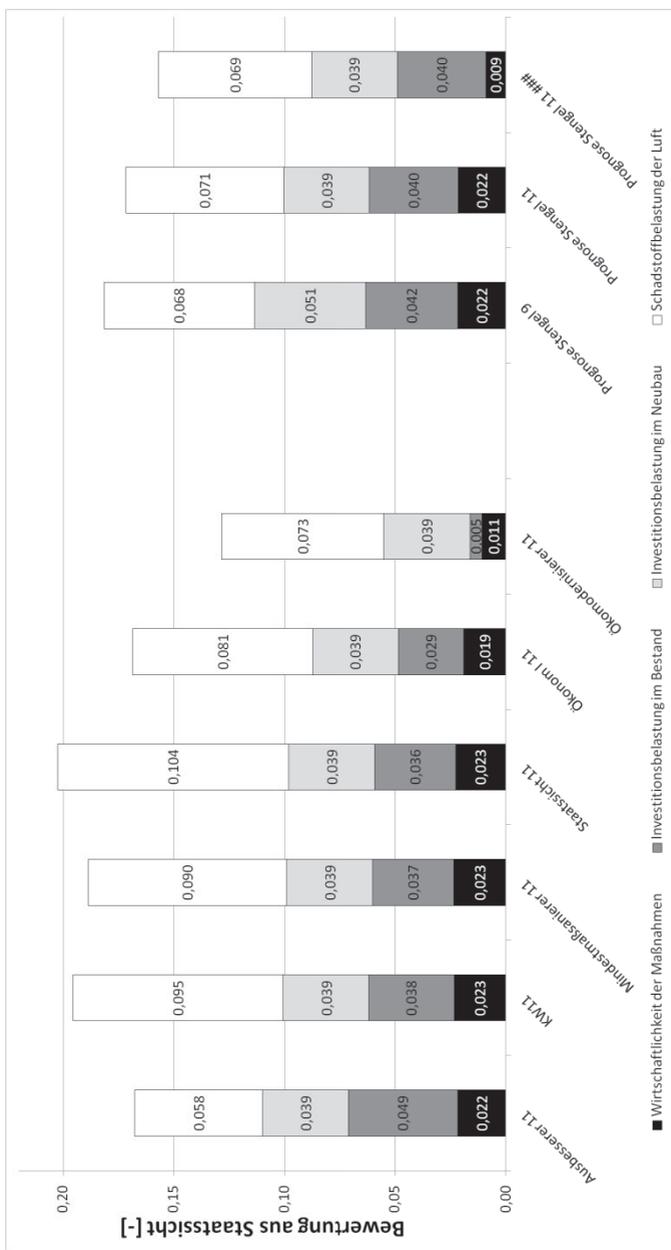


Abbildung 49: Teilnutzen ausgewählter Szenarien aus Staatssicht in der Dimension *Lebensqualität* differenziert nach Ebene-3-Indikatoren

Unter den Prognoseszenarien führt, ausgehend vom Szenario *Prognose Stengel 9*, sowohl eine Verschärfung der Mindestanforderungen gemäß Szenario *Prognose Stengel 11* als auch die zusätzliche Erhöhung der Energiesteuern gemäß Szenario *Prognose Stengel 11 ###* zu einer sinkenden *Lebensqualität*. Bedingt wird dies maßgeblich durch eine erhöhte *Investitionsbelastung im Bestand* sowie die durch diese und die um 50% erhöhten Energiepreise bewirkte Erhöhung der Gesamtausgaben für die Wärmeversorgung der Gebäude (vgl. *Wirtschaftlichkeit der Maßnahmen*).

Sozialer Zusammenhalt

Unter den Extremszenarien nimmt der Teilnutzen *Einkommensverteilung (nach Wohnen) Selbstnutzer* der Dimension *sozialer Zusammenhalt*, ausgehend vom Szenario *Ausbesserer 11*, mit steigender *Generationengerechtigkeit* bis zum Szenario *KW11* zu und anschließend ab. Die Szenarien *Ökonom I 11* und *Ökomodernisierer 11* führen dabei zu einem niedrigeren Teilnutzen als das Szenario *Ausbesserer 11*. Die Teilnutzen *Einkommensverteilung (nach Wohnen) Mieter* bzw. *Selbstnutzer* erreichen beide ihr Maximum im Szenario *KW11* und sinken bei zunehmender *Generationengerechtigkeit* bis zu ihrem Minimum im Szenario *Ökomodernisierer 11* wieder ab.

Die Teilnutzen der Dimension *sozialer Zusammenhalt* sinken, ausgehend vom Prognoseszenario *Prognose Stengel 9*, durch die Verschärfung der Mindestanforderungen für Selbstnutzer und Mieter leicht ab (gerundet dargestellt). Die Erhöhung der Energiesteuern gemäß Szenario *Prognose Stengel 11 ###* zeigt, wie erwartet, den niedrigsten Teilnutzen *sozialer Zusammenhalt*. Im Vergleich zu den Szenarien *Mindestmaßsanierer 11*, *KW11* und *Staatssicht 11* zeigen die Prognoseszenarien sowohl für Selbstnutzer als auch für Mieter teils deutliche Verbesserungspotenziale.

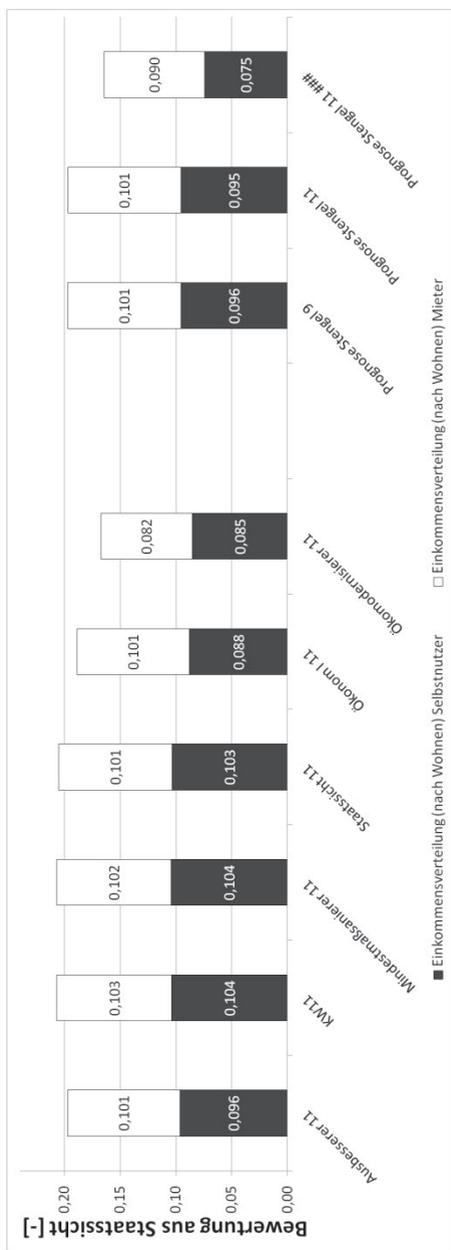


Abbildung 50: Teilnutzen ausgewählter Szenarien aus Staatssicht in der Dimension *sozialer Zusammenhalt* differenziert nach Ebene-3-Indikatoren

7.5.2 Implikationen hinsichtlich der Hauptforschungsfrage

Aus den aggregierten Bewertungen der betrachteten Szenarien ergeben sich Implikationen hinsichtlich der Hauptforschungsfrage „Welche Bündel umweltpolitischer Instrumente sind für den Bereich Wärmenutzung in Wohngebäuden geeignet, um die Treibhausgas- und Luftschadstoffemissionen sowie den Primärenergieverbrauch zu reduzieren?“, die im Folgenden erläutert werden.

Szenario Ausbesserer 11

Das Szenario *Ausbesserer 11* führt unter den Extremszenarien zum niedrigsten Gesamtnutzen aus Staatssicht. Eine Reduktion der Auftrittshäufigkeit der dem Szenario zugrundeliegenden Entscheidertypen/-strategien, bspw. zugunsten der Entscheidertypen/-strategien des Szenarios *Mindestmaßsanierer 11*, würde den Gesamtnutzen erhöhen. Dies könnte z. B. durch verstärkte Kontrollen der Einhaltung der Mindestanforderungen erreicht werden. Eine derartige Verschiebung hätte eine Erhöhung der Teilnutzen *Einkommensverteilung (nach Wohnen) Selbstnutzer* und *Mieter* zur Folge und wäre demnach für Selbstnutzer, Mieter und – aufgrund einer angenommenen 11%-Umlage der Modernisierungsinvestitionen – auch für Vermieter ökonomisch vorteilhaft.

Szenario Ökonom I 11

Eine Reduktion der Auftrittshäufigkeit der dem Szenario *Ökonom I 11* zugrundeliegenden Entscheidertypen/-strategien zugunsten derjenigen der Szenarien *KW11* und *Staatssicht 11* wäre mit einer Erhöhung des Gesamtnutzens verbunden. Diese Verschiebung wäre für Selbstnutzer und Mieter auch ökonomisch vorteilhaft. Aus Sicht der Vermieter wäre die Verschiebung unter den getroffenen Annahmen nicht notwendigerweise ökonomisch vorteilhaft, da in den Szenarien von einer 11%-Umlage ausgegangen wird und die Investition durch den Wechsel gesenkt wird. Allerdings könnte durch die Besserstellung der Mieter das Leerstandsrisiko reduziert werden. Um derartige Verschiebungen zu ermöglichen, müssen allerdings die dem Szenario *Ökonom I 11* zugrundeliegenden Hemmnisse beseitigt werden. Diese umfassen einerseits die be-

grenzte Liquidität von Selbstnutzern, deren Beseitigung durch entsprechende Kreditangebote anvisiert werden könnte (vgl. Abschnitt 7.4.4) – allerdings sind in den Szenarien *KW11* und *Staatssicht 11* im Mittel ohnehin niedrigere Investitionen notwendig. Andererseits wird im Szenario *Ökonom I 11* die Amortisationszeit (zusätzlich zum Kapitalwert) als Entscheidungskriterium herangezogen und führt im Vergleich zum Szenario *KW11* zu verstärkten Investitionen in die Wärmeversorgungspakete des Gebäudes und letztlich zu einem „schlechteren“ Kapitalwert. Grund hierfür ist, dass Investitionen in Wärmeversorgungspakete häufig kürzere Amortisationszeiten aufweisen als Investitionen in die energetische Modernisierung der Gebäudehülle. Da die Wärmeversorgungspakete aber auch kürzere Lebensdauern aufweisen, führte der Kapitalwert häufig zu einer anderen Entscheidung. Ansätze zur Überwindung dieses Hemmnisses könnten Informationskampagnen zur langfristigen ökonomischen Planung sowie Maßnahmen zur Reduktion bzw. Übertragung des Risikos langfristiger Investitionen sein. Dieses Risiko wird neben Energiepreisentwicklungen und Nutzerverhalten insbesondere durch die unsichere Nutzungsdauer der Maßnahmenpakete sowie seinen am Markt durchsetzbaren Wert bzw. Restwert bedingt. Daher könnte bspw. verstärkt *Energieeffizienzcontracting (auch für die Gebäudehülle)* eingesetzt, Merkmale zu Energieeffizienz und erneuerbaren Energien in den Mietspiegel aufgenommen sowie allgemein die Transparenz derartiger Merkmale auch bei selbstgenutztem Wohneigentum erhöht werden. In Gebieten mit starkem Bevölkerungsrückgang kann die Verwendung kürzerer Planungshorizonte jedoch ggf. gerechtfertigt sein.

Szenario *KW11*

Das Szenario *KW11* führt zu einem höheren Gesamtnutzen als das Szenario *Mindestmaßsanierer 11*. Daher könnte eine Ausrichtung der Mindestanforderungen am Szenario *KW11* (vgl. Abschnitt 7.3.4) eine Erhöhung des Gesamtnutzens aus Staatssicht unterstützen.

Szenario Staatssicht 11

Das Szenario *Staatssicht 11* führt zum höchsten Gesamtnutzen und dominiert das Szenario *KW11* in den Dimensionen *Generationengerechtigkeit* und *Lebensqualität*. Daher könnte der Staat den Einsatz von Instrumenten zur Unterstützung des Szenarios *Staatssicht 11* anstreben, um den Gesamtnutzen zu erhöhen. Da die Teilnutzen *Wirtschaftlichkeit der Maßnahmen* sowie *Einkommensverteilung (nach Wohnen) Mieter* und *Selbstnutzer* beim Übergang, ausgehend vom Szenario *KW11*, sinken, könnten sich finanzielle Förderungen als Kompensation der Wirtschaftlichkeitsverschlechterung und damit zur Erhöhung der wirtschaftlichen Attraktivität der zugrundeliegenden Maßnahmenpakete eignen. Bei einer Förderung gemäß den Szenarien *KW11 \$\$*, *KW11 \$\$\$* und *KW11 Steuer* ist allerdings die Potenzialnutzung gering und die Überförderung groß, sodass ein Gesamtnutzen aus Staatssicht von maximal 0,53 (vgl. Tabelle 115) resultiert. Da dieser nicht über dem des Szenarios *KW11* liegt, ist eine effizientere Förderung notwendig (vgl. Abschnitt 7.3.5), um den Gesamtnutzen aus Staatssicht zu erhöhen. Des Weiteren können sich insbesondere bei Mietern durch eine übermäßige bzw. ungleichmäßige finanzielle Belastung „soziale Brennpunkte“ ergeben, die entweder durch die Reduktion der Modernisierungsumlage auf unter 11% oder Transferleistungen des Staates kompensiert oder gemildert werden könnten (vgl. Abschnitt 7.4.5).

Szenario Ökomodernisierer 11

Die im Vergleich zu den anderen Szenarien hohen Investitionen im Szenario *Ökomodernisierer 11* führen bei der angewendeten Normierung und Gewichtung zu einem niedrigeren Gesamtnutzen als in den Szenarien *KW11* und *Staatssicht 11*. Das Szenario *Ökomodernisierer 11* weist allerdings unter den Extremszenarien die höchste *Generationengerechtigkeit*, die zweitniedrigsten *Treibhausgasemissionen*, aber relativ hohe *Luftschadstoffemissionen* auf. Eine andere Gewichtung der Dimension *Generationengerechtigkeit* sowie der im Szenario *Ökomodernisierer 11* mit niedrigerem Teilnutzen einhergehenden

Dimensionen *Lebensqualität* und *sozialer Zusammenhalt* würde die Rangfolge der Szenariobewertungen verändern.

Prognoseszenarien

Die Prognoseszenarien zeigen, dass auch ohne Verschiebungen zwischen den Entscheidertypen und -strategien eine Verschärfung der Mindestanforderungen zu einem erhöhten Gesamtnutzen führt. Eine Erhöhung der Energiepreise bewirkt dahingegen eine starke finanzielle Belastung der Bewohner und einen niedrigeren Gesamtnutzen, sofern keine adäquaten Transferleistungen erbracht werden.

Insgesamt sind die angewendete Bewertung aus Staatssicht und die Folgerungen nur als exemplarisch zu interpretieren. Diese ändern sich bei Anpassung von Normierungen und Gewichtungen an die Präferenzen der jeweiligen Entscheidungsträger.

7.5.3 Exemplarische detaillierte Indikatoren

Nach der aggregierten Darstellung der Indikatoren in den vorigen Abschnitten wird im Folgenden die Möglichkeit aufgezeigt, mit *AWOHM* die aggregierten Indikatoren detaillierter aufzuschlüsseln. Dabei wird einerseits die räumliche und andererseits die zeitliche Auflösung exemplarisch erhöht.

Erhöhung der räumlichen Auflösung

Abbildung 51 zeigt die räumliche Verteilung der direkten gebietsflächenspezifischen SO_2 -, NO_x - und PM-Emissionen (vgl. Kapitel 6) aus Wohngebäuden auf Kreisebene für die Jahre 2006 und 2030 in den Szenarien *Prognose Stengel 11 \$\$\$* und *Staatssicht 11*. Die räumliche Verteilung der Emissionen im Jahr 2006 wird maßgeblich durch die Energieträgerverteilung und die Bevölkerungsdichte beeinflusst. Die höchsten SO_2 - und NO_x -Emissionen treten, bedingt durch eine hohe Bevölkerungsdichte, im Ruhrgebiet, in den Umkreisen von Frankfurt am Main und Stuttgart sowie in größeren Städten wie München und Berlin auf. Tendenziell sind SO_2 - und NO_x -Emissionen sowie stärker ausge-

prägt auch PM-Emissionen im Süden höher als im Norden. Neben der Bevölkerungsdichte kann dies insbesondere darauf zurückgeführt werden, dass im Süden Heizöl und im Norden Gas der am häufigsten im Jahr 2006 für die Wärmebereitstellung in Wohngebäuden eingesetzte Energieträger war (Stengel u. a. 2012). In den neuen Bundesländern sind die SO₂- und NO_x-Emissionen geringer als in Niedersachsen und Schleswig-Holstein. Bei den PM-Emissionen ist dies umgekehrt. Dies kann ggf. durch eine niedrigere Bevölkerungsdichte in den neuen Bundesländern bei gleichzeitig höherem Anteil an Festbrennstoffen erklärt werden.

Im Szenario *Staatssicht 11* ist eine deutliche Reduktion der betrachteten Emissionsarten bis 2030 zu erkennen, wobei in Kreisen mit hoher Bevölkerungsdichte wie im Ruhrgebiet und Berlin vereinzelt noch relativ hohe Emissionen auftreten. Bei PM treten zudem in weiteren Gebieten, bspw. in Sachsen, noch mittlere Emissionshöhen auf. Dies kann z. B. auf Festbrennstofffeuerungen zurückgeführt werden, die in *AWOHM* bis 2030 aufgrund der angesetzten Lebensdauern nicht alle ausgetauscht werden. Im Szenario *Prognose Stengel 11* weisen nur die PM-Emissionen eine deutliche Reduktion auf. Bei SO₂ und insbesondere bei NO_x sind vor allem in den bevölkerungsreichen Bundesländern nur geringe Veränderungen zum Jahr 2006 zu beobachten.

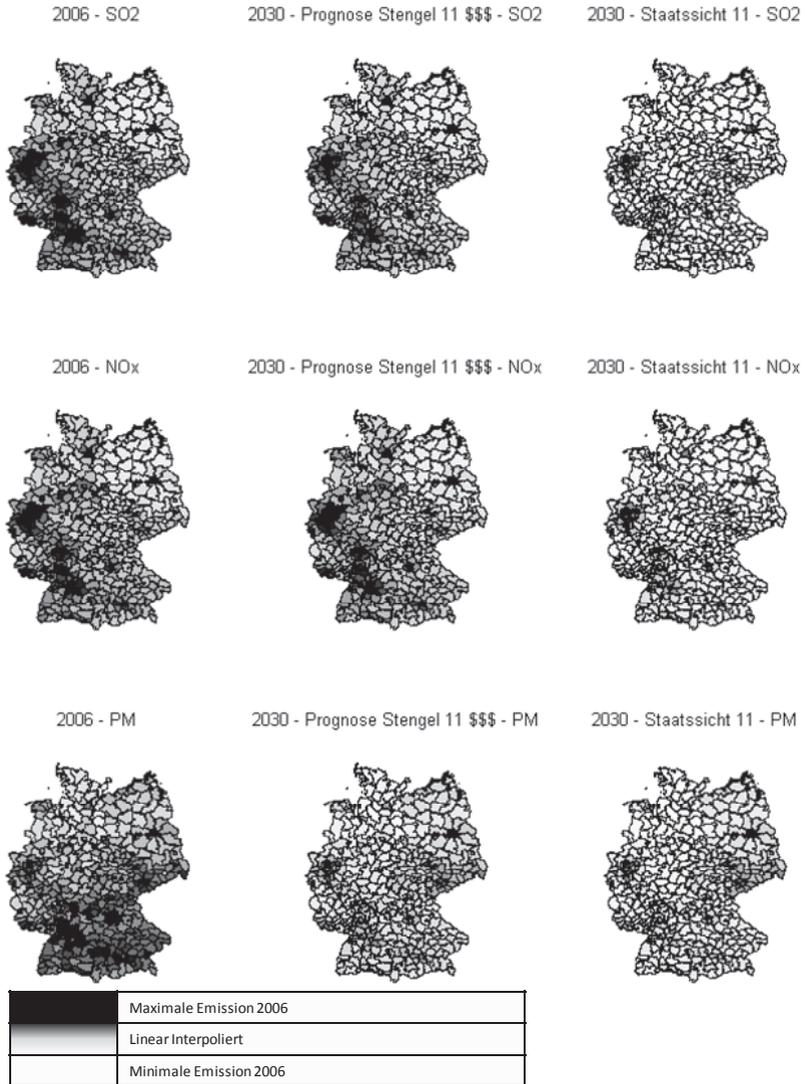


Abbildung 51: Direkte gebietsflächenbezogene NO_x-, PM- und SO₂-Emissionen [kg/(km² a)] aus Wohngebäuden auf Kreisebene für die Jahre 2006 und 2030 in den Szenarien *Prognose Stengel 11 \$\$\$* und *Staatssicht 11*

Erhöhung der zeitlichen Auflösung

Abbildung 52 zeigt die zeitliche Entwicklung der direkten PM-Emissionen aus Wohngebäuden in Deutschland für die Szenarien *Ökomodernisierer 11 W**, *Ökomodernisierer 11* und *Prognose Stengel 11 \$\$\$* (vgl. Abschnitt 7.4.1). Ausgehend von 100% im Jahr 2006 steigen die Emissionen im Szenario *Ökomodernisierer 11 W** durch den massiven Einsatz von mit solarthermischer Unterstützung kombinierten Holzpelletkesseln bis zum Jahr 2026 auf 195% an, obwohl zur Sanierung anstehende Gebäudehüllen vollständig gemäß der höchsten Qualitätsstufe modernisiert werden. Da zu diesem Zeitpunkt mit Ausnahme der Festbrennstofffeuerungen, bei denen ein längerer Sanierungszyklus angesetzt wurde, alle Wärmeerzeuger bereits ausgetauscht wurden, sinken die Emissionen bis zum Jahr 2030 wieder auf 171% ab. Grund hierfür ist die fortwährende Modernisierung von Gebäudehüllen und der Austausch von Festbrennstofffeuerungen, die teilweise höhere PM-Emissionsfaktoren als Holzpelletkessel aufweisen. Durch die Verschärfung der Mindestanforderungen an die Wärmeerzeuger bzw. das Verbot von Holzpelletkesseln ohne Partikelabscheider sinken die PM-Emissionen dahingegen kontinuierlich ab dem Jahr 2006 und liegen knapp über der Verlaufskurve des Szenarios *Prognose Stengel 11 \$\$\$*.

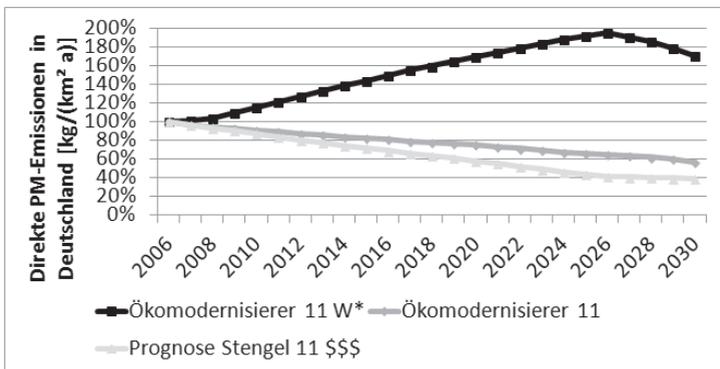


Abbildung 52: Zeitliche Entwicklung der direkten PM-Emissionen aus Wohngebäuden in Deutschland für die Szenarien *Ökomodernisierer 11 W**, *Ökomodernisierer 11* und *Prognose Stengel 11 \$\$\$* von 2006 bis 2030

8. Schlussfolgerungen und Ausblick

8.1 Das aktorsbasierte Wohngebäude- und Haushaltsmodell

AWOHM

Im Rahmen dieser Arbeit wurde das aktorsbasierte Wohngebäude- und Haushaltsmodell *AWOHM* entwickelt. Zielsetzung der Modellentwicklung war die Identifizierung von aus Staatssicht adäquaten Bündeln umweltpolitischer Instrumente im Themenfeld Wärmenutzung in Wohngebäuden.

Wegen ihres entscheidenden Einflusses auf die ökologische, ökonomische und soziale Dimension der Nachhaltigkeit in Deutschland liegt der Bereich Wärmenutzung in Wohngebäuden im Fokus politischer Entscheidungsträger. Die gezielte Beeinflussung dieses Bereichs mittels umweltpolitischer Instrumente stellt ein multikriterielles Entscheidungsproblem mit teils synergetischen und teils konfligierenden Zielen dar. Daher eignen sich Methoden der multikriteriellen Entscheidungsunterstützung für die Bewertung von durch ein Bündel umweltpolitischer Instrumente beeinflussten Entwicklungspfaden des Energiesystems Wärme in Wohngebäuden. Eine Analyse des Stands der Wissenschaft in Kapitel 3 zeigte jedoch, dass existierende Wohngebäudebestandsmodelle zur Politikunterstützung im Themenfeld Wärmenutzung sich meist auf die ökologische Dimension im Rahmen einer oder weniger Emissionsarten oder des Energieverbrauchs konzentrieren. Eine ökonomische Bewertung erfolgt dabei, wenn überhaupt, nur eingeschränkt. Luftschadstoffemissionen und deren räumliche Verteilung sowie eine soziale Bewertung im Sinne finanzieller Umverteilungswirkungen werden in den betrachteten Modellen nicht abgebildet. Zur Simulation der Entwicklungspfade des Wohngebäudebestands werden meist pauschale Sanierungsraten angesetzt. Die technischen, ökonomischen und ausschöpfbaren Potenziale²²⁶ bleiben dabei wie die vielfältigen ökologischen, ökonomischen und sozialen Auswirkungen weitgehend unberücksichtigt. Die Charakteristika von Eigentümern und Bewohnern, die nebst der Be-

²²⁶ Vgl. Definitionen in den Abschnitten 8.3.1, 8.3.2 und 8.3.3.

wertung etwaiger Entwicklungspfade des Wohngebäudebestands aus Staats-sicht die Modernisierungstätigkeit (gemäß Analysen von Sanierungsentscheidungen in Kapitel 4) und damit die Ausschöpfbarkeit von Potenzialen beeinflussen, werden nicht explizit berücksichtigt. Existierende Wohngebäudebestandsmodelle erfordern zudem die Vorgabe von Instrumentenbündeln bzw. von deren Struktur als Modelleingangsgröße. Vorschläge für eine Neu- bzw. Umgestaltung von Instrumenten, die auf modellendogen bestimmten Potenzialen und Hemmnissen basieren, werden daher nicht ermöglicht, wie bspw. eine Zielgruppenanpassung von Instrumentenbündeln.

Die genannten Defizite wurden im Rahmen dieser Arbeit aufgegriffen und konnten großteils beseitigt werden. Das aktorsbasierte Wohngebäude- und Haushaltsmodell *AWOHM* ermöglicht auf Mikroebene die Simulation konsistenter und plausibler Entwicklungspfade des Wohngebäude- und Haushaltsbestands in Deutschland bei unterschiedlichen Bündeln umweltpolitischer Instrumente bis zum Jahr 2030. Basis hierfür ist eine Stichprobe von ca. 227.000 Haushalten und Wohnungen. Die räumliche Auflösung des Modells entspricht primär Bundesland-Gemeindegrößenklassen-Kombinationen, wurde aber näherungsweise auf Gemeindeebene erhöht. Durch die integrierte Abbildung von Gebäuden und Haushalten können erstmals sowohl die Sanierungsentscheidung beeinflussende Haushaltscharakteristika als auch die Auswirkungen von Sanierungen vor dem Hintergrund der tatsächlichen Wohnsituation berücksichtigt werden. Haushaltsveränderungen, die bspw. aus Todesfällen, Geburten und Umzügen resultieren, werden hierfür u. a. durch Zufallsziehungen gemäß an der amtlichen Statistik angelehnten Wahrscheinlichkeitsverteilungen bzw. durch mit diesen Daten parametrisierte Regressionsmodelle bei der Modellierung berücksichtigt. Gebäudeeigentümer, d. h. Selbstnutzer und Vermieter, werden als individuelle Akteure modelliert, die Sanierungsentscheidungen gemäß vorgegebenen annahmenbasierten oder empirisch fundierten Nutzenfunktionen treffen. Durch die Variation der Nutzenfunktionen und deren Zuordnung zu konkreten Entscheidern im Rahmen von Szenarien können techni-

sche, ökonomische und ausschöpfbare Potenziale abgeschätzt werden. Dem entwickelten Ansatz und damit auch den Ergebnissen inhärente Unsicherheiten wurden typisiert und durch *Monte-Carlo*-Simulationen und Szenarien bei Auswertungen berücksichtigt.

Um die simulierten Entwicklungspfade des Gebäudebestands unter Berücksichtigung von Synergien und Konflikten aus Staatssicht bewertbar zu machen bzw. Vor- und Nachteile herauszustellen, wurde ein multikriterieller Bewertungsansatz ausgewählt. Dabei wurde in Anlehnung an die deutsche Nachhaltigkeitsstrategie (vgl. Bundesregierung 2002) und die zugehörigen Nachhaltigkeitsindikatoren (vgl. Statistisches Bundesamt 2010) ein spezieller, für den Bereich Wärmenutzung in Wohngebäuden und die Modellstruktur geeigneter, Indikatorensatz definiert.

Neben dieser starren indikatorenbasierten Bewertung wurden die Clusteranalyse nutzende Verfahren entwickelt, die basierend auf dem auf Mikroebene simulierten Modelloutput die hemmnis- und potenzialgetriebene Ausgestaltung umweltpolitischer Instrumente ermöglichen. Ausgehend von der technischen Gebäudespezifikation und dem ökonomischen Emissionsreduktionspotenzial können dabei durch die Bündelung ähnlicher Gebäude homogene Mindestanforderungspakete und Förderpakete mit hohem Reduktionspotenzial und niedriger Überförderung identifiziert werden. Zudem lassen sich Gebäude-Haushalts-Konstellationen identifizieren, die sich hinsichtlich ihrer Eignung für bestimmte umweltpolitische Instrumente ähneln, und dadurch Instrumentenbündel für diese Zielgruppen zusammenstellen. Des Weiteren können auch Haushaltscluster mit drohenden „sozialen Brennpunkten“ im Sinne übermäßiger finanzieller Belastungen – insbesondere von einkommensschwachen Haushalten – und die Notwendigkeit von Ausgleichsmaßnahmen identifiziert werden.

Das entwickelte Modell wurde in Bezug auf die Erstellung des Startbestands der Simulation, d. h. eines Abbilds des Wohngebäude- und Haushaltsbestands auf Mikroebene im Jahr 2006, detailliert plausibilisiert. Bei der Erstellung die-

ses Startbestands, dessen Veränderung bis zum Jahr 2030 mit *AWOHM* simuliert werden kann, werden Datensätze aus unterschiedlichen Quellen über Zufallsziehungen kombiniert. Es zeigte sich, dass die Unsicherheiten von Kenngrößen auf Mikroebene zwar groß, diejenige der Häufigkeitsverteilungen dieser Kenngrößen allerdings gering sind. Zudem geht eine Erhöhung der räumlichen Auflösung mit einer Zunahme der Unsicherheiten einher. Die Analyse ergab auch eine starke Abhängigkeit der Unsicherheiten von den konkreten Kenngrößen. Bspw. weisen PM- und VOC-Emissionen in *AWOHM* größere Unsicherheiten auf als NO_x- und SO₂-Emissionen. Die Plausibilisierung der Bestandsveränderung erfolgte bedingt durch Datenlage und Modelllaufzeit weniger detailliert.

Der originäre methodische Beitrag der vorliegenden Arbeit umfasst die Entwicklung eines aktorsbasierten Wohngebäude- und Haushaltsmodells für den Bereich Wärmenutzung, das Simulation und Nachhaltigkeitsbewertung plausibler und konsistenter Entwicklungspfade des Gebäude- und Haushaltsbestands in Abhängigkeit von Bündeln umweltpolitischer Instrumente unter Berücksichtigung von Unsicherheiten ermöglicht. Darüber hinaus wurden auf der Clusteranalyse basierende Ansätze zur Um- und Ausgestaltung umweltpolitischer Instrumente entwickelt, die den auf Mikroebene simulierten Modellinput und -output nutzen.

8.2 Kritische Würdigung des Modells

Im Folgenden wird das entwickelte, aktorsbasierte Wohngebäude- und Haushaltsmodell kritisch diskutiert, bzw. es werden Grenzen der Aussagefähigkeit der Modellergebnisse aufgezeigt. Dazu werden jeweils die Granularität, die Systemgrenzen, der Modellierungsansatz zur Bestandsentwicklung, der Bewertungsansatz aus Staatssicht sowie die multivariaten Analyseverfahren als zentrale Elemente vor dem Hintergrund der Beantwortung der Forschungsfragen kritisch betrachtet.

Granularität

Die Modellierung des Bestands und der Entwicklung einzelner Gebäude und Haushalte auf Mikroebene erfordert, wie auch die Erhöhung der räumlichen Auflösung bis auf Gemeindeebene, die Kombination von Datensätzen. In der Folge resultieren Unsicherheiten im Startbestand und der Bestandsentwicklung von Wohngebäuden und Haushalten, die durch eine Reduktion der Granularität reduziert werden könnten. Für den Startbestand im Jahr 2006 konnte mittels *Monte-Carlo*-Simulationen jedoch gezeigt werden, dass ausgewählte Strukturdaten und Indikatoren zwar auf Mikroebene eine relativ hohe Unsicherheit aufweisen, diese aber bei der anschließenden Aggregation der Indikatoren wiederum sinkt und Randverteilungen über den gesamten Bestand plausibel getroffen werden. Aus Laufzeitgründen wurden derartige Unsicherheitsanalysen bisher für die dynamische Bestandsentwicklung nur am Rande durchgeführt. Bspw. zeigte sich im Rahmen der zahlreichen Modellläufe, die zur Identifizierung der in dieser Arbeit dokumentierten Modellläufe durchgeführt wurden, dass auch für die dynamische Bestandsentwicklung auf aggregierter Ebene stabile Ergebnisse resultieren. Gleiches gilt für die multivariaten Analysen der Modellergebnisse auf Mikroebene, die durch die verwendete Granularität erst ermöglicht werden.

Insgesamt sind die aus der hohen Granularität resultierenden Unsicherheiten für eine Bewertung auf aggregierter Ebene vor dem Hintergrund der von der Granularität weitgehend unabhängigen Unsicherheiten durchaus vertretbar. Zudem wird gerade durch diese hohe Granularität die Ableitung neuartiger Erkenntnisse basierend auf den Zusammenhängen zwischen Gebäude, Anlagentechnik und Haushalten ermöglicht.

Systemgrenzen

In *AWOHM* werden die aus Sicht des Wohngebäudesektors indirekten Emissionen – bspw. aus Raffinerien, der Herstellung von Dämmstoffen und Heizkraftwerken – nicht berücksichtigt, sodass die Gesamtbelastung der Umwelt

unterschätzt wird. Dies entspricht dem für die Emissionsberichterstattung international üblichen Quellenprinzip, das auch bspw. von Hansen (2009a) und Matthes u. a. (2013) in Wohngebäudebestandsmodellen zugrundegelegt wird. Dabei werden bspw. Emissionen bei der Fernwärme- und Elektrizitätserzeugung dem Energiesektor zugerechnet. Die Anwendung des Quellenprinzips in *AWOHM* ist einerseits darauf zurückzuführen, dass *AWOHM* einer Weiterentwicklung des *Teilmodells Wohngebäude* des ebenfalls nach dem Quellenprinzip bilanzierenden otello-Modellsystems (vgl. Abschnitt 3.1.4), in dem die aus Sicht des Wohngebäudesektors indirekten Emissionen in anderen Teilmodellen berücksichtigt werden, entspricht. Deshalb wurde *AWOHM* derart weiterentwickelt, dass es sich mit diesen Teilmodellen wieder zusammenführen lässt, damit zukünftig bspw. Verschiebungseffekte zwischen Energiesektor, produzierendem Gewerbe und Wohngebäudesektor analysiert werden können. Andererseits werden die Luftschadstoffemissionen in *AWOHM* auf die Siedlungsfläche für Wohnzwecke bezogen und es kann nicht davon ausgegangen werden, dass die indirekten Emissionen im (selben) Wohngebiet anfallen. Darüber hinaus sind die durch die Wärmenutzung im gesamten Wohngebäudebestand bedingten indirekten Emissionen im Vergleich zu den direkten von untergeordneter Bedeutung (vgl. Abschnitt 2.1). Ein Wechsel zu Elektrizität und Fernwärme wird in *AWOHM* zudem ausgeschlossen, sodass die Auswirkungen auf die simulierten Sanierungsentscheidungen vernachlässigbar sind.

Des Weiteren konnten in *AWOHM* aufgrund der Datenlage Nebenfeuerstätten nicht berücksichtigt werden. Auf deren Einbeziehung in die Modellierung wurde allerdings bewusst verzichtet, da bei der existierenden Datenlage davon ausgegangen werden kann, dass aufgrund zusätzlicher Unsicherheiten nicht belastbare Ergebnisse resultieren würden. Die mit *AWOHM* abgeleiteten Ergebnisse sind vor diesem Hintergrund zu interpretieren.

Modellierungsansatz zur Bestandsentwicklung

Menschliches Verhalten kann nur mit Einschränkungen modelliert werden. Zu diesem zählen in *AWOHM* sowohl die Sanierungsentscheidung als auch die

Haushaltsentwicklung betreffende Entscheidungen. Die Simulation der Sanierungsentscheidung mittels der multikriteriellen Bewertung einzelner Maßnahmenpakete aus Gebäudeeigentümersicht reagiert sensitiv auf die Indikatorauswahl, -normierung und -gewichtung. Da eben diese Größen bei den in *AWOHM* u. a. angewandten annahmenbasierten Sanierungsentscheidungsmodellen überwiegend auf Annahmen basieren, die zwar mittels der Literatur argumentativ und qualitativ begründet, aber nur auf aggregierter Ebene plausibilisiert werden können, dient der Ansatz primär der Simulation transparenter und plausibler Entwicklungspfade des Gebäudebestands im Sinne von „Wenn-Dann“-Aussagen. Ähnliches gilt für die Simulation der Haushaltsbestandsentwicklung. Die Einschränkungen hinsichtlich der Simulation des menschlichen Verhaltens bei den Sanierungsentscheidungen entfallen allerdings vollständig bei der Bestimmung technischer und ökonomischer Potenziale. Zudem wird durch *AWOHM* erstmals die Abschätzung ausschöpfbarer Reduktionspotenziale für Energieverbrauch sowie für Treibhausgas- und Luftschadstoffemissionen auf Mikroebene bzw. für differenzierte Haushalts- und Gebäudegruppen ermöglicht. Um den dem Ansatz inhärenten Unsicherheiten gerecht zu werden, werden für die ausschöpfbaren Potenziale neben Punktschätzungen auch robustere Intervallschätzungen vorgenommen (vgl. Abschnitt 8.3.3). Zudem zeigt ein Vergleich von empirisch fundierten Sanierungsentscheidungsmodellen, die für Selbstnutzer²²⁷ ebenfalls in *AWOHM* integriert wurden, mit den annahmenbasierten Modellen, dass letztere plausiblere Ergebnisse erzeugen und somit geringere Unsicherheiten aufweisen (vgl. Abschnitt 7.4.3). Darüber hinaus werden auch aus dem relativen Vergleich von Gebäude- und Haushaltsentwicklungspfaden Erkenntnisse gewonnen, wobei sich Unsicherheiten durch beidseitiges auftreten ggf. ausgleichen.

²²⁷ Für Vermieter liegen keine derartigen Daten vor (vgl. Abschnitt 3.2.3).

Bewertungsansatz aus Staatssicht

Die multikriterielle Bewertung aus Staatssicht mittels einer Nutzwertanalyse reagiert sensitiv auf die Indikatorauswahl, -normierung und -gewichtung. Die konkreten Bewertungsergebnisse können daher nur als exemplarisch angesehen werden. Die überwiegend angewandte Gleichgewichtung ist allerdings eine verbreitete Methode (vgl. Nardo u. a. 2005). Der verwendete Bewertungsansatz ermöglicht zudem die strukturierte Darstellung der Ergebnisse sowie das Aufzeigen von Vor- und Nachteilen, Zielkonflikten und der Dominanz unterschiedlicher Entwicklungspfade des Wohngebäudebestands. Prinzipiell kann der Ansatz an die Bedürfnisse der Entscheidungsträger auf Staatsseite angepasst werden. Alternativ könnten zwar auch andere Verfahren der multikriteriellen Entscheidungsunterstützung mit ihren jeweiligen Vor- und Nachteilen eingesetzt werden. Die Nutzwertanalyse ist aber transparent und leicht verständlich. Zudem weisen kompliziertere Verfahren ähnliche Schwachstellen auf, bzw. der Informationsbedarf für deren Anwendung ist größer.

Multivariate Analyseverfahren

Wegen ihrer Eignung für die Problemstellung wurde die Clusteranalyse als multivariates Analyseverfahren ausgewählt. Der gewählte Fusionierungsalgorithmus ist zwar nicht deterministisch. Im Rahmen der zahlreichen Modellläufe, die zur Identifizierung der in dieser Arbeit dokumentierten Modellläufe durchgeführt wurden, zeigte sich jedoch, dass die Ergebnisse strukturell reproduzierbar sind. Für die Clusterung von Haushalten wurde die Simulation der Haushaltsbestandsentwicklung deaktiviert und es wurden somit die Haushaltseigenschaften aus dem Startjahr der Simulation, dem Jahr 2006, verwendet. Bei der Interpretation der Ergebnisse muss daher berücksichtigt werden, dass sich die Haushaltseigenschaften sowie die Wohnsituation im Laufe der Jahre verändern. Die Beibehaltung der Haushaltscharakteristika hat den Vorteil, dass diese für das Jahr 2006 kleinere Unsicherheiten aufweisen als die dynamisch simulierten Charakteristika. Zudem werden bei dem Vergleich von Gebäude- und Haushaltsentwicklungspfaden nicht zahlreiche Gebäude durch

zufallsziehungsbedingte Abweichungen unvergleichbar. Des Weiteren beziehen sich abgeleitete Erkenntnisse dann auf die Haushalte, die „ab jetzt“ bzw. „ab 2006“ durch suasorische Instrumente erreicht werden sollten, und sind somit leichter interpretierbar. Als Alternative zur Clusteranalyse könnten zwar auch andere multivariate Analyseverfahren oder optimierende Ansätze auf die Problemstellung angewandt werden. Die Clusteranalyse erwies sich im Rahmen der Modellanwendung aber als geeignet und lieferte interpretierbare und strukturell reproduzierbare Ergebnisse.

Sonstiges

Das Startjahr der Simulation liegt im Jahr 2006. Prinzipiell ließe sich die Datenbasis aber mittels des Mikrozensus 2010 und des Zensus 2011 aktualisieren bzw. erweitern. Des Weiteren nimmt der Energieträgerwechsel zu Gas und Solarthermie eine zentrale Rolle unter den Ergebnissen ein. Es wurden zwar für Gas pauschale Energieträgerwechselinvestitionen berücksichtigt, aber nicht die Verfügbarkeit des Energieträgers in den jeweiligen Gemeinden bzw. Straßenzügen. Hinsichtlich der Solarthermienutzung wurden die Solarstrahlung und die Dachausrichtung nicht in Bezug auf Regionen oder konkrete Gebäude differenziert. Auch der technische Fortschritt, Veränderungen im Elektrizitätsmix, Erfahrungs- und Lerneffekte sowie weitere Technologien bei Sanierungen, wie der Einsatz von Wärmepumpen oder der Wechsel zu oder von Nah- bzw. Fernwärme, wurden im Modell bisher nicht berücksichtigt.

Insgesamt wurde auf entsprechende Erweiterungen von *AWOHM* bisher jeweils aus mindestens einem der drei folgenden Gründe verzichtet. Erstens standen einige Daten nicht oder erst kurz vor Fertigstellung der Arbeit zur Verfügung bzw. sind mit hohen Unsicherheiten behaftet. Zweitens liegt der Fokus von *AWOHM* auf der Integration von Gebäude- und Haushaltsinformationen, sodass die Einarbeitung der erwähnten Daten nicht prioritär behandelt wurde, zumal da großteils von einem mäßigen Einfluss auf die Modellergebnisse ausgegangen wird, bzw. die primären Unsicherheiten in anderen Modellbereichen liegen. Drittens ergibt sich die Bedeutung einiger Aspekte erst als

Ergebnis dieser Arbeit, sodass deren Berücksichtigung a priori nicht möglich war. Entsprechende zukünftige Modellerweiterungen sind allerdings mit dem in *AWOHM* verfolgten Ansatz grundsätzlich kompatibel.

8.3 Beantwortung der Forschungsfragen

In diesem Abschnitt werden auf Basis der Ergebnisse der vorhergehenden Kapitel alle im Kapitel 1 aufgeworfenen Forschungsfragen abschließend bzw. zusammenfassend behandelt. Der primäre Fokus liegt dabei auf der Beantwortung der Hauptforschungsfrage **„Welche Bündel umweltpolitischer Instrumente sind für den Bereich Wärmenutzung in Wohngebäuden geeignet, um die Treibhausgas- und Luftschadstoffemissionen²²⁸ sowie den Primärenergieverbrauch zu reduzieren?“** in Abschnitt 8.3.8. Vorbereitend werden die Teilfragen aus Kapitel 1 jeweils separat in den Abschnitten 8.3.1 bis 8.3.7 beantwortet.

Abschnitt 8.3.1 geht auf die technischen Reduktionspotenziale für Emissionen und den Energieverbrauch ein, welche als Referenzwerte genutzt werden. Abschnitt 8.3.2 beschäftigt sich mit den ökonomischen Reduktionspotenzialen aus Gebäudeeigentümersicht, deren Veränderung durch Förderungen sowie den Reduktionspotenzialen bei einem Kompromiss aus Wirtschaftlichkeit und Umweltschutz. Zudem werden effiziente Ausgestaltungen von Mindestanforderungen und Förderpaketen, die wirtschaftlichere Maßnahmenpakete vorschreiben und eine niedrigere Überförderung bewirken, diskutiert. In Abschnitt 8.3.3 wird die Ausschöpfbarkeit der Reduktionspotenziale vor dem Hintergrund des Entscheidungsverhaltens der Gebäudeeigentümer und der umweltpolitischen Instrumente erörtert. Anschließend fasst Abschnitt 8.3.4 Zielkonflikte zusammen, die sich im Rahmen der Nachhaltigkeitsbewertung der den Reduktionspotenzialen zugrundeliegenden Gebäude- und Haushaltsbestandsentwicklungspfade ergeben.

²²⁸ Vgl. Fußnote 187 und Abschnitt 8.2 bez. indirekter Emissionen. Diese werden in *AWOHM* nicht berücksichtigt.

In Abschnitt 8.3.7 wird gezeigt, wie eine sozio-demographische Analyse der Haushalte und ihrer Reduktionspotenziale das Erkennen und teilweise die Beseitigung von Hemmnissen unterstützen kann. Dabei wird erläutert, wie umweltpolitische Instrumente an diese Potenziale und Hemmnisse angepasst werden können, um die Ausschöpfbarkeit der Reduktionspotenziale zu erhöhen. Abschnitt 8.3.6 beschäftigt sich mit der Verteilung der durch die energetische Modernisierung des Wohngebäudebestands bedingten finanziellen Lasten und einer etwaigen Überlastung einkommensschwacher Haushalte. In Abschnitt 8.3.7 wird darauf eingegangen, wie derartige Lasten gezielt verschoben werden können, um die „Zumutbarkeit“ für Wohngebäudeeigentümer und -bewohner zu erhöhen.

8.3.1 Technisches Potenzial

Wie groß sind die technischen Reduktionspotenziale für Treibhausgas- und Luftschadstoffemissionen sowie den Primärenergieverbrauch?

Die technischen Reduktionspotenziale im Bereich Wärmenutzung in Wohngebäuden wurde in Abschnitt 7.2 definiert als maximale Emissionsminderung bzw. Energieverbrauchsreduktion bei den in *AWOHM* vorgegebenen technischen Möglichkeiten und unter Beibehaltung der zeitlichen Kopplung von Modernisierungsmaßnahmen an die Sanierungszyklen von Gebäudehülle und Wärmeversorgungspaket. Eine vollständige energetische Modernisierung der Gebäudehülle führt zu einer von der betrachteten Emissions- und Energieart unabhängigen prozentualen Reduktion. Daher sind die Reduktionspotenziale tendenziell umso größer, je stärker sich die Primärenergie- und Emissionsfaktoren der Wärmeversorgungspakete reduzieren lassen bzw. je stärker sie sich zwischen den Wärmeversorgungspaketen unterscheiden. Deshalb steigen die Reduktionspotenziale von 2006 bis 2030 vom End- und gesamten Primärenergieverbrauch (41% bzw. 46%) über die CO₂-Emissionen (49%) bis zum nicht erneuerbaren Primärenergieverbrauch (76%) sowie den Emissionen an CO₂

exkl. Biomasse²²⁹ (85%), CH₄ (73%) und Luftschadstoffen (71-85%) an. Die- sen Reduktionspotenzialen liegen allerdings nicht immer dieselben Maßnah- menpakete zugrunde, d. h. es treten Zielkonflikte auf, die insbesondere aus Vor- und Nachteilen der Energieträger Holzpellets und Gas resultieren. Als „das“ technische Reduktionspotenzial wurde – als Referenz für das ökonomi- sche Reduktionspotenzial – exemplarisch dasjenige postuliert, das den mit den niedrigsten NO_x-Emissionen einhergehenden Maßnahmenpaketen entspricht. Als Wärmeerzeuger kommen dabei aufgrund niedriger Emissionsfaktoren am häufigsten Gasbrennwertkessel mit solarthermischer Unterstützung zum Ein- satz. In der Folge sinken die technischen Reduktionspotenziale für den nicht erneuerbaren bzw. gesamten Primärenergieverbrauch um 33% bzw. 4%²³⁰ sowie für die Emissionen an CH₄ und CO₂ exkl. Emissionen aus Biomasse um 77% (auf -4%) und 36% (bezogen auf 2006). Die Zielkonflikte können durch technische Lösungsansätze angegangen bzw. gemildert werden, bspw. durch die Erhöhung des solaren Deckungsanteils bei Gasfeuerungen zur weiteren Reduktion von nicht erneuerbarem Primärenergieverbrauch und Emissionen. Weiterhin könnten bspw. bei Festbrennstofffeuerungen die PM-Emissionen durch die Entwicklung effektiverer Partikelabscheider reduziert werden.

8.3.2 Ökonomisches Potenzial

Wie groß sind die ökonomischen Reduktionspotenziale für Treibhausgas- und Luftschadstoffemissionen sowie den Primärenergieverbrauch?

Das ökonomische Reduktionspotenzial wurde in Abschnitt 7.3 definiert als die Reduktion, die bei Entscheidung der Gebäudeeigentümer gemäß Kapitalwert aus Selbstnutzersicht resultiert. Dieses kann, sofern es auf „das“ technische

²²⁹ In dieser Arbeit werden Emissionen exkl. bzw. inkl. Emissionen aus Biomasse auch verkürzt als Emissionen exkl. bzw. inkl. Biomasse bezeichnet.

²³⁰ Prozentuale Angaben zu Änderungen oder Abweichungen von Prozentangaben werden in dieser Arbeit durchgehend *nicht* als Prozent der Prozentangabe verwen- det. Stattdessen wird bspw. unter einem Anteil von 5%, der um 5% erhöht wird, ein Anteil von 10% verstanden.

Potenzial bezogen wird, als Ausnutzungsgrad interpretiert werden. Ohne Förderung und bei Mindestanforderungen gemäß *EnEV 2009-50%*²³¹ ist dieser für die Emissionen an NO_x bzw. CO₂ exkl. Biomasse mit 59% bzw. 74% am niedrigsten sowie für PM-Emissionen mit 93% bzw. für CH₄-Emissionen, bei denen Reduktionen statt Erhöhungen auftreten, am höchsten (dies entspricht dem Szenario *KW11*). Bei den CO₂-Emissionen inkl. Biomasse, den SO₂- und NMVOC-Emissionen sowie dem End- und Primärenergieverbrauch liegen die Ausnutzungsgrade bei 75-86%. Insgesamt sind die ökonomischen Potenziale damit bereits ohne Förderung mit Ausnutzungsgraden von mindestens 59% (in Bezug auf das technische Potenzial) vielversprechend. Die zugehörige energetische Vollsanierrate von 1,7% im Jahr 2006 ist aber nahezu doppelt so hoch wie die im Energiekonzept der Bundesregierung für den *Status quo* genannte von 1% (Bundeskabinett 2010). Daher bietet sich aus ökologischer und ökonomischer Sicht ein Vollzug der Mindestanforderungen, kombiniert mit ihrer Anpassung an die wirtschaftlichsten Maßnahmenpakete, an. Zur Ausgestaltung entsprechender Mindestanforderungspakete wurde eine Clusteranalyse der Gebäude anhand ihrer Charakteristika vor und nach der Sanierung gemäß maximalem Kapitalwert durchgeführt (vgl. Abschnitt 7.3.4). Dieses Vorgehen ermöglicht die Identifizierung homogener Gebäudecluster, die sich jeweils für die Spezifikation eines Mindestanforderungspakets eignen. Dabei wird implizit eine Differenzierung von Mindestanforderungen nach dem Gebäudezustand vor der Sanierung in Betracht gezogen, da dieser Einfluss auf die Wirtschaftlichkeit von Maßnahmenpaketen nimmt. Von zehn Gebäudeclustern wurden in Abschnitt 7.3.4 zwei exemplarisch analysiert.

²³¹ Darunter sind um ca. 50% reduzierte Wärmedurchgangskoeffizienten im Vergleich zur EnEV 2009 bei der Sanierung, erhöhte Anforderungen an die Wärmeerzeuger (Verbot von Holzpelletkesseln ohne Partikelabscheider u. a. Wärmeerzeugern; vgl. Qualitätsstufen in Tabelle 131 in Anhang A.1) und erhöhte Anforderungen an den Neubau zu verstehen. Das Verbot von Holzpelletkesseln ohne Partikelabscheider betrifft allerdings in der Realität die 1. BImSchV und nicht die EnEV.

Ausgehend von dem Ausnutzungsgrad ohne Förderung von 75% für CO₂-Emissionen inkl. Biomasse (stellvertretend ausgewählt) kann dieser durch Energiepreiserhöhungen um 25-50% auf 79-80% gesteigert werden. Dadurch stiegen allerdings die Gesamtausgaben der Haushalte für die Wärmeversorgung um 17-34% an. Die in *AWOHM* abgebildeten Varianten von Investitionszuschüssen und der steuerlichen Abzugsfähigkeit energetischer Modernisierungen können den Ausnutzungsgrad bei Förderausgaben pro CO₂-Vermeidung von über 330 €/t auf 78-80% steigern. Entschiede allerdings jeder Gebäudeeigentümer von selbst (wie im Szenario *Staatssicht 11* definiert) gemäß einem Kompromiss aus Wirtschaftlichkeit und Umweltschutz, so resultierte daraus ein höherer Ausnutzungsgrad von 90%, der bei individueller Förderung in Höhe der Kapitalwertverschlechterung im Vergleich zum wirtschaftlichsten Maßnahmenpaket mit niedrigeren Förderausgaben pro CO₂-Vermeidung von ca. 57 €/t erreichbar wäre. Dies verdeutlicht die Existenz eines Potenzials für eine verbesserte Ausgestaltung der Förderstruktur mit einem höheren Ausnutzungsgrad und niedrigeren Förderausgaben pro CO₂-Vermeidung. Aufgrund der (zu) hohen Anzahl an notwendigen Förderpaket-spezifikationen bei einer individuellen Förderung wurde ein Ansatz zur Ausgestaltung von Förderpaketen entwickelt, der zu einer vorgegebenen Anzahl von Förderpaketen und vorgegebenen Förderausgaben pro CO₂-Vermeidung vielversprechende Förderpakete identifiziert. Dabei werden Gebäude anhand ihrer Charakteristika vor und nach der (angestrebten) Sanierung sowie gemäß der Förderhöhe, die notwendig wäre, um die Kapitalwertverschlechterung im Vergleich zum wirtschaftlichsten Maßnahmenpaket auszugleichen, in möglichst homogenen Clustern zusammengefasst. Eine Differenzierung von Förderpaketen nach dem Gebäudezustand vor der Sanierung wird dabei in Betracht gezogen, da dieser Einfluss auf die Wirtschaftlichkeit, die Emissionsreduktion und die Energieeinsparung von Maßnahmenpaketen nimmt. Bei einer exemplarischen Anwendung des Ansatzes in Abschnitt 7.3.5 wurden 13 Förderpakete identifiziert, die bei mittleren Förderausgaben von 70 €/t den Aus-

nutzungsgrad auf ca. 84% steigern könnten. Vier der Förderpakete wurden detailliert analysiert. Eine präzise Formulierung der Förderpaketspezifikationen sowie deren Abgrenzung zu den Mindestanforderungspaketspezifikationen stehen allerdings noch aus.

8.3.3 Ausschöpfbares Potenzial

Wie groß sind die ausschöpfbaren Reduktionspotenziale für Treibhausgas- und Luftschadstoffemissionen sowie den Primärenergieverbrauch?

Das ausschöpfbare Potenzial wurde in Abschnitt 7.4 definiert als der Teil des ökonomischen Potenzials, der in der Realität genutzt werden kann. Die Ausnutzung des ökonomischen Potenzials wird bspw. durch mangelnde Möglichkeiten zur Finanzierung, Informationsdefizite und Sanierungsunwilligkeit behindert (vgl. Kapitel 4). Das ausschöpfbare Potenzial ist daher neben den technischen und ökonomischen Randbedingungen des Gebäudes auch von umweltpolitischen Instrumenten sowie Charakteristika der Gebäudeeigentümer und -bewohner bzw. dem Entscheiderverhalten abhängig. In den zur Abschätzung dieses Potenzials eingesetzten Szenarien wurden deshalb sowohl *umweltpolitische Instrumente* als auch die zur Simulation des Entscheiderverhaltens herangezogenen *Entscheidungsansätze* variiert. Die umweltpolitischen Instrumente gewinnen ihre Bedeutung durch ihre Einsetzbarkeit und Veränderbarkeit durch den Staat. Das Entscheiderverhalten im Sinne der Entscheidungsansätze dahingegen kann zwar nur mittelbar durch den Staat bzw. Instrumente beeinflusst werden, aber beeinflusst seinerseits die Wirksamkeit der Instrumente und die Entwicklung des Wohngebäudebestands. Sonstige Szenarioelemente wurden mit dem Ziel der besseren Vergleichbarkeit konstant gehalten. Aufgrund der großen Unsicherheiten, die mit der Abschätzung des ausschöpfbaren Potenzials einhergehen, wurden zwei komplementäre Ansätze verfolgt – basierend auf *Extrem Szenarien* und *Prognoseszenarien*.

Extremszenarien

Den in Abschnitt 7.4.1 definierten Extremszenarien liegt die Annahme zugrunde, dass Selbstnutzer jeweils einem der annahmenbasierten Entscheidungstypen *Ausbesserer*, *Mindestmaßsanierer*, *Ökonom* und *Ökomodernisierer* entsprechen und dass Vermieter jeweils gemäß einer der Entscheiderstrategien *Abbruchstrategie*, *Substanzerhaltungsstrategie Basis* bzw. *Erweitert*, *langfristige Modernisierungsstrategie* und *Ökomodernisierungsstrategie* handeln (vgl. Abschnitt 5.4.4). In Extremszenarien werden dann die Entwicklungspfade des Gebäudebestands simuliert, bei denen alle Selbstnutzer demselben Entscheidungstyp entsprechen und alle Vermieter gemäß derselben Entscheiderstrategie, die zudem ein Pendant des ausgewählten Entscheidungstyps ist, handeln. Bei Mindestanforderungen gemäß *EnEV 2009-50%*²³² (inkl. der obligatorischen Verwendung von Partikelabscheidern bei Holzpelletkesseln) ohne Förderung werden diese Szenarien mit *Ausbesserer 11* (*Ausbesserer* und *Abbruchstrategie*), *Mindestmaßsanierer 11* (*Mindestmaßsanierer* und *Substanzerhaltungsstrategie Basis*), *Ökonom I 11* (*Ökonom* und *Substanzerhaltungsstrategie Erweitert*), *Ökonom II 11* (*Ökonom* und *langfristige Modernisierungsstrategie*) und *Ökomodernisierer 11* (*Ökomodernisierer* und *Ökomodernisierungsstrategie*) bezeichnet. Sofern das Auftreten von *Ausbesserern* und *Abbruchstrategien* durch Vollzug der Mindestanforderungen verhindert wird, ergeben sich Korridore für die ausschöpfbaren Reduktionspotenziale von -28% bis 85% für alle Emissions- und Energieverbrauchsarten. Die Mindestreduktion steigt dabei von NO_x (-28%) und CO₂ inkl. Emissionen aus Biomasse (14%) über Endenergie (31%), gesamte und nicht erneuerbare Primärenergie sowie CO₂ exkl. Emissionen aus Biomasse (36-38%) bis zu SO₂, PM, CH₄ und NMVOC (43%-58%). Bei Einbeziehung von *Ausbesserern* und *Abbruchstrategien* sinken die Mindestreduktionen auf -28% bis 3%, mit Ausnahme von PM, CH₄ und NMVOC (43-48%). Das Zulassen von Holzpelletkesseln ohne Partikelabscheider sowie die Reduktion der Mindestanforderungen auf ein Niveau gemäß EnEV 2009

²³² Vgl. Fußnote 231.

führt zu einem teils starken Absinken der Mindestreduktionen. In Abschnitt 8.3.8 wird zudem diskutiert, welche Entscheidertypen und -strategien die Entwicklungspfade des Gebäudebestands aus Staatssicht verbessern bzw. verschlechtern. Darauf aufbauend werden umweltpolitische Instrumente zur Unterbindung von Fehlentwicklungen und zur Unterstützung vielversprechender Teilentwicklungen identifiziert, die auch zur Erhöhung des ausschöpfbaren Potenzials führen.

Prognoseszenarien

Um nicht nur typisiertes Extremverhalten zu simulieren, sondern eine Prognose der Gesamtentwicklung zu ermöglichen, wurden in Abschnitt 7.4.1 auch *Prognoseszenarien* definiert. Zunächst wurden vier Szenarien ohne Förderung und mit Mindestanforderungen gemäß EnEV 2009 verglichen, die sich nur hinsichtlich der Entscheidungsansätze unterscheiden. Das Szenario *Prognose Stengel 9*, in dem die Gebäudeeigentümer den bereits erwähnten Entscheidertypen und -strategien basierend auf der Eigentümerstruktur und den soziodemographischen Eigenschaften der Bewohner zugeordnet wurden, lieferte dabei die u. a. hinsichtlich der Sanierungsrate plausibelsten Ergebnisse. Die Zuordnung von Gebäudeeigentümern zu Entscheidertypen und -strategien auf Basis empirischer Erhebungen zu Sanierungseinstellungen und geplanten Sanierungen sowie die Nutzung empirisch basierter Entscheidungsansätze (für Selbstnutzer) führten dahingegen zu überhöhten Sanierungsraten. Als Basis für die Abschätzung der ausschöpfbaren Reduktionspotenziale durch eine Variation der umweltpolitischen Instrumente wurde das plausibelste Szenario (also *Prognose Stengel 9*) herangezogen.

Ohne Veränderung der Entscheidungsansätze resultieren bei Berücksichtigung der modellierten Instrumente die höchsten ausschöpfbaren Reduktionspotenziale bei einer Verschärfung der Mindestanforderungen gemäß *EnEV 2009-50%* ohne Förderung (für CO₂ inkl. Emissionen aus Biomasse und NO_x in Kombination mit einer Erhöhung der Energiepreise um 50%). Die Reduktion steigt dabei von NO_x (9%) über CO₂ inkl. Emissionen aus Biomasse (16%), Endener-

gie und gesamte Primärenergie (19-21%), nicht erneuerbare Primärenergie und CO₂ exkl. Emissionen aus Biomasse (26%) sowie SO₂ (29%) bis zu PM, CH₄ und NMVOC (52-62%). Dabei konnten u. a., ausgehend von der Situation mit Mindestanforderungen gemäß EnEV 2009 ohne Förderung, die PM-Emissionsreduktionen durch die Verschärfung der Mindestanforderungen von 48% auf 62% gesteigert werden. Grund hierfür ist überwiegend, dass Holzpelletfeuerungen in diesem Szenario nur noch mit Partikelabscheider eingesetzt werden dürfen. Die sonstigen Emissions- und Energieverbrauchsreduktionen konnten durch die Verschärfung der Mindestanforderungen um 1-4% erhöht werden. Investitionszuschüsse, steuerliche Abzugsfähigkeit und die Erhöhung der Energiepreise ermöglichten nur noch eine geringe weitere Reduktionssteigerung um bis zu 1%. In all diesen Szenarien werden jedoch die ökonomischen Reduktionspotenziale aus Eigentümersicht teilweise beträchtlich verfehlt, so z. B. um 10% bzw. 21% bei CO₂ exkl. bzw. inkl. Biomasse, 12% bei PM, 35% bei NO_x und 41% bei SO₂.

Insgesamt zeigt sich, dass die Emissions- und Energieverbrauchsreduktionen zwischen den Extremszenarien deutlich größere Schwankungen aufweisen als bei reiner Variation der umweltpolitischen Instrumente in den Prognoseszenarien. Demnach sind ggf. Verschiebungen zwischen den Extremszenarien bzw. den von diesen repräsentierten Entscheidungstypen und -strategien vielversprechend. Erreicht werden können diese durch die Anpassung umweltpolitischer Instrumente an die betroffenen Akteure sowie durch in *AWOHM* nicht direkt abgebildete umweltpolitische Instrumente wie bspw. den Vollzug der Mindestanforderungen.

8.3.4 Zielkonflikte der Nachhaltigkeitsbewertung

Hinsichtlich welcher Teilbereiche der Nachhaltigkeitsbewertung²³³ treten Zielkonflikte auf?

Zielkonflikte treten zwischen unterschiedlichen Emissions- und Energiearten bei den technischen Reduktionspotenzialen sowie zwischen den Dimensionen bzw. Indikatoren der indikatorenbasierten, nachhaltigkeitsorientierten Bewertung der mit *AWOHM* simulierten Gebäude- und Haushaltsbestandsentwicklungspfade auf. Bei den technischen Reduktionspotenzialen dominiert der Zielkonflikt zwischen den Maßnahmenpaketen mit minimalem gesamtem Primärenergieverbrauch und denjenigen mit minimalen NO_x -Emissionen. Der niedrigste Primärenergieverbrauch wird mit dem häufigen Einsatz einer Kombination aus Holzpelletkesseln und Solarthermiekollektoren (sowie vollständiger Dämmung der Gebäudehülle) erreicht. Dabei sind auch der nicht erneuerbare Primärenergieverbrauch sowie die Emissionen an CO_2 exkl. Biomasse minimal. Die CH_4 -Emissionen sind ebenfalls nahezu minimal. Die stärkste NO_x -Emissionsreduktion wird dahingegen gemeinsam mit minimalem Endenergieverbrauch sowie minimalen SO_2 -, NMVOC-, PM- und CO_2 -Emissionen inkl. Biomasse durch den häufigen Einsatz einer Kombination aus Gasbrennwertgeräten und Solarthermiekollektoren erreicht.

Zielkonflikte in Bezug auf die nachhaltigkeitsorientierte, indikatorenbasierte Bewertung werden im Folgenden auf Basis der für die Bestimmung ökonomischer und ausschöpfbarer Potenziale verwendeten Szenarien *Ausbesserer 11*, *KW11*, *Mindestmaßsanierer 11*, *Staatsicht 11*, *Ökonom I 11* und *Ökomodernisierer 11* (sortiert nach steigendem Teilnutzen in der Dimension *Generationengerechtigkeit*) diskutiert. Ausgehend vom Szenario *Ausbesserer 11* geht eine Verbesserung der *Generationengerechtigkeit* zunächst mit einer Verbes-

²³³ Die Nachhaltigkeitsbewertung wird durch den Betrachtungsgegenstand von *AWOHM*, d. h. den Gebäude- und Haushaltsbestand, und die mit *AWOHM* bereitstellbaren Informationen eingeschränkt, sodass jeweils nur Teilaspekte der Nachhaltigkeit bzw. ihrer Dimensionen und Kriterien abgedeckt werden (können).

serung der *Lebensqualität* und des *sozialen Zusammenhalts* einher. Ab dem Szenario *Mindestmaßsanierer 11* ist allerdings eine weitere Erhöhung der *Generationengerechtigkeit* mit einem sinkenden *sozialen Zusammenhalt* verbunden. Die *Lebensqualität* sinkt nach einem kurzzeitigen Rückgang im Szenario *Mindestmaßsanierer 11* ab dem Szenario *Staatssicht 11* kontinuierlich ab. Der Anstieg der *Generationengerechtigkeit* wird bedingt durch steigende Investitionen in Energieeffizienz und erneuerbare Energien, eine Abnahme des Verbrauchs fossiler Brennstoffe sowie (zunächst) sinkende Treibhausgasemissionen.

Der anfängliche Anstieg der *Lebensqualität*, ausgehend vom Szenario *Ausbesserer 11*, ist auf sinkende Luftschadstoffemissionen und zunehmende Wirtschaftlichkeit der Maßnahmen bei relativ niedriger Investitionsbelastung zurückzuführen. Im Szenario *Staatssicht 11* sinkt allerdings die Wirtschaftlichkeit der Maßnahmen bei steigender Investitionsbelastung wieder, wobei die Luftschadstoffemissionen zunächst noch weiter sinken. Eine weitere Erhöhung der Investitionen, wie in den Szenarien *Ökonom I 11* und *Ökomodernisierer 11*, wird aber begleitet von wieder steigenden Luftschadstoffemissionen, woraus eine sinkende *Lebensqualität* resultiert.

Der anfängliche Anstieg des *sozialen Zusammenhalts*, ausgehend vom Szenario *Ausbesserer 11*, ist darauf zurückzuführen, dass die getätigten Investitionen sowohl für Selbstnutzer wirtschaftlich sind als auch nicht warmmietenerhöhend wirken. Da im Szenario *Mindestmaßsanierer 11* im Vergleich zum Szenario *KW11* verstärkt in die Gebäudehülle investiert wird, was häufig mit langen Amortisationszeiten verbunden ist, tritt bei den Mietern aufgrund einer unterstellten Modernisierungsumlage von 11% eine Warmmietenerhöhung auf, während die Investitionen der Selbstnutzer noch eine vergleichbare Wirtschaftlichkeit aufweisen. Die Warmmietenneutralität könnte dabei nur bei einer niedrigeren Modernisierungsumlage erreicht werden, wodurch sich allerdings *ceteris paribus* der Kapitalwert aus Vermietersicht verschlechterte. Eine weitere Erhöhung der Investitionen, wie in den Szenarien *Ökonom I 11* und

Ökomodernisierer 11, führt aber sowohl bei Mietern als auch bei Selbstnutzern zu einem deutlich sinkenden Einkommen nach Wohnen, sodass sich der *soziale Zusammenhalt* stark verringert.

8.3.5 Cluster mit techno-ökonomischen Potenzialen

Wie verteilen sich die techno-ökonomischen Potenziale²³⁴ auf sozio-demographische Cluster?

Um den gemäß Bewertung aus Staatssicht vielversprechenden Gebäudebestandsentwicklungspfad des Szenarios *Staatssicht 11*, in dem jeder Gebäudeeigentümer hypothetisch gemäß einem techno-ökonomischen Kompromiss aus Wirtschaftlichkeit (ökonomisches Potenzial) und Umweltschutz (technisches Potenzial) entscheidet, zu unterstützen, wurden die Gebäudebewohner anhand von Merkmalen, die für die sozio-demographische Charakterisierung der Haushalte sowie die Priorisierung und Eignung von umweltpolitischen Instrumenten relevant sind, in Clustern zusammengefasst (vgl. Abschnitt 7.4.4). Selbstnutzer und Mieter wurden dabei jeweils in sieben Cluster eingeteilt, die mit aussagekräftigen Namen²³⁵ versehen wurden. Diese Zielgruppen (aus Staatssicht) werden im Folgenden hinsichtlich ihrer CO₂-Vermeidungspotenziale und der Eignung umweltpolitischer Instrumente charakterisiert.

²³⁴ Darunter wird in dieser Arbeit ein aus Staatssicht adäquater Kompromiss aus technischen und ökonomischen Potenzialen verstanden.

²³⁵ Nicht alle Cluster- bzw. Zielgruppennamen beziehen sich auf dasselbe Merkmal. Stattdessen wurden jeweils hervorstechende Merkmale bzw. Merkmalsmittelwerte für die Namensgebung herangezogen, um die Lesbarkeit im Vergleich zu den Bezeichnungen „Cluster A“ etc. zu verbessern. Die Namen weisen daher keine hinreichende Trennschärfe für eine eindeutige Zuordnung eines Haushalts zu einem Cluster auf, für die das bei der Clusteranalyse verwendete Proximitätsmaß herangezogen werden muss (vgl. Abschnitt 6.2). Mit diesem wird die Distanz eines Haushalts zu dem Schwerpunkt eines Clusters unter Berücksichtigung aller für die Clusteranalyse herangezogenen Merkmale quantifiziert.

Selbstnutzer

Die Selbstnutzer wurden in die sieben Zielgruppen *Potenzialreichste, Akademiker, Jüngere, Gutverdiener, Umweltsünder, Rentner* und *Wenigverdiener* eingeteilt. Bei den **Potenzialreichsten** liegt mit **30%** Anteil am CO₂-Vermeidungspotenzial das größte Gesamtpotenzial. Sie erfordern mit einer Förderhöhe von 9% (der Investition) den stärksten Fördereingriff, wobei die Fördersumme aufgrund etwaiger Liquiditätsprobleme über zinsvergünstigte Darlehen bereitgestellt werden sollte. Alle weiteren Zielgruppen erfordern dahingegen eine Förderung von maximal 5%, sodass eine Differenzierung der Förderhöhe unter diesen nicht prioritär erscheint. Das Instrument der (vollständigen) steuerlichen Abzugsfähigkeit energetischer Modernisierungen ist in der betrachteten Ausgestaltung bei allen Zielgruppen, überwiegend aufgrund von Überförderung, ungeeignet. Die **Akademiker, die Jüngeren** und die **Gutverdiener** haben einen Anteil von **13%, 11%** und **1%** am Vermeidungspotenzial und weisen kaum Hemmnisse auf. Die *Jüngeren* benötigen allenfalls eine Unterstützung bei der Kreditaufnahme. Bei allen drei Zielgruppen kann eine aufeinander abgestimmte Mischung aus Mindestanforderungen, Förderungen und auf die Zielgruppencharakteristika angepassten Informationskampagnen unterstützen. Die **Umweltsünder** haben einen Anteil von **22%** am Gesamtpotenzial und das höchste CO₂-Vermeidungspotenzial pro Haushalt. Da damit auch die höchsten Investitionen bei in der Relation niedrigem Haushaltsnettoeinkommen einhergehen, sollte die Förderung ggf. mit Instrumenten zur Übernahme des Kreditrisikos durch den Staat oder andere Akteure kombiniert werden, um die Kreditvergabe überhaupt zu ermöglichen. Die **Rentner** haben einen Anteil von **13%** am Gesamtpotenzial. Aufgrund ihres hohen Alters (im Mittel 71 Jahre) sind bei der Förderung Investitionszuschüsse zinsvergünstigten Krediten vorzuziehen. Bei der Informationspolitik bietet sich eine Doppelstrategie an, die auf die Mobilisierung der Potenziale bei den „Alt“-Eigentümern und beim Eigentumswechsel ausgerichtet ist. Die **Wenigverdiener** haben einen Anteil von **9%** am Gesamtpotenzial. Ob sie in der Lage sind, die

Investition zu tätigen, ist einkommensbedingt fraglich, sodass sich ggf. *Contracting* für Wärmeversorgungspakete und die energetische Modernisierung der Gebäudehülle anbietet, um das Potenzial zu nutzen.

Mieter

Die Mieter wurden in die sieben Zielgruppen *Potenzialreichste*, *Rentner*, *Jüngere*, *Wenigverdiener*, *Gutverdiener*, *Bestverdiener* und *potenzielle Umrüster* eingeteilt. Die ***Potenzialreichsten*** haben einen Anteil von **46%** am CO₂-Vermeidungspotenzial. Der Cluster erfordert mit einer Förderhöhe von 5% den stärksten Fördereingriff. Wegen der zu erwartenden starken Kaltmieten-erhöhungen sind ggf. informatorische Maßnahmen zur Akzeptanzerhöhung von Modernisierungen oder Konzepte wie Warmmieten oder Teilwarmmieten geeignet. Bei den übrigen Clustern liegt die Förderhöhe bei 3-4%, sodass hinsichtlich der Förderhöhe keine Differenzierung zwischen den Clustern notwendig erscheint. Die ***Rentner*** und die ***Jüngeren*** haben Anteile von **15%** und **14%** am Gesamtpotenzial. Aufgrund niedriger Investitionshöhen sind aus finanzieller Sicht prinzipiell geringe Akzeptanzprobleme zu erwarten. Da in den ersten Jahren nach der Sanierung bei einer Umlage von 11% ggf. Warmmietenerhöhungen auftreten, bieten sich ggf. sukzessive steigende, an den Energiepreisanstieg gekoppelte und damit warmmietenneutrale Mieterhöhungen an. Dies ist insbesondere für diese Haushalte relevant, da altersbedingt von erhöhten Sterbe- und Umzugsraten ausgegangen werden kann, sodass die Bewohner ggf. in der Phase mit niedrigeren Warmmieten im Vergleich zur Unterlassungsalternative nicht mehr in der jeweiligen Wohnung leben. Die ***Wenigverdiener*** haben einen Anteil von **10%** am Gesamtpotenzial. Da diese vermutlich größtenteils Wohngeld beziehen, sind ggf. Anpassungen zur Zulässigkeit höherer Kaltmieten bei niedrigeren Warmmieten notwendig. Die ***Gutverdiener*** und die ***Bestverdiener*** haben Anteile von **9%** und **5%** am Gesamtpotenzial. Es sind keine finanziell begründbaren Akzeptanzprobleme zu erwarten. Die ***potenziellen Umrüster*** haben einen Anteil von **2%** am Gesamtpotenzial. Aufgrund äußerst hoher Investitionen (Wechsel zu zentraler Wärmeversor-

gung und Energieträgerwechsel) kann die Modernisierungsumlage (je nach Modernisierungsanteil) von den Haushalten ggf. nicht getragen werden. Auch der Abbruch der Gebäude und ein etwaiger Ersatzneubau ist als Option in Betracht zu ziehen.

Einschränkungen

Die Ausführungen beziehen sich nur auf die operationalisierten Hemmnisse. Hemmnisse wie die Angst vor Schimmel können bspw. nicht berücksichtigt werden. Bei vermietetem Wohneigentum konzentriert sich die Argumentation, bedingt durch die Datenlage, auf die Mieter. Lügen weitere Informationen über die Vermieter vor, so könnten die umweltpolitischen Instrumente besser an die eigentlichen Entscheider angepasst werden.

Um die identifizierten Zielgruppen in der Realität mit entsprechenden, bspw. informatorischen, Instrumenten erreichen zu können, müssten die jeweiligen Cluster vor diesem Hintergrund analysiert werden. Ziel wäre hierbei eine möglichst trennscharfe Adressierbarkeit der jeweiligen Gebäudeeigentümer und -bewohner anhand weniger Merkmale.

8.3.6 Lastenverteilung und „soziale Brennpunkte“

Welche Akteure²³⁶ tragen die Hauptlasten der Transformation des Energiesystems Wärmenutzung in Wohngebäuden, und führt dies zur übermäßigen Belastung einkommensschwacher Haushalte?

Basierend auf der gemäß Bewertung aus Staatssicht vielversprechenden Entwicklung im Szenario *Staatssicht 11* (bzw. *Staatssicht 11 MA*; vgl. Abschnitt 7.4.5) wurden die Selbstnutzer und die Mieter mittels eines auf der Clusteranalyse basierenden Ansatzes hinsichtlich ihrer sozio-demographischen Eigenschaften, der Investitionshöhe und der Auswirkungen der umgesetzten Maßnahmenbündel auf die Ausgaben für das Wohnen in möglichst homogenen

²³⁶ Der Fokus liegt, bedingt durch die Struktur von *AWOHH*, auf selbstnutzenden Eigentümern und Mietern. Auf Vermieter wird in Abschnitt 8.3.7 eingegangen. Sonstige Akteure werden in Bezug auf diese Forschungsfrage nicht berücksichtigt.

Clustern zusammengefasst (vgl. Abschnitt 7.4.5). Der Fokus lag dabei auf der Situation direkt nach der Sanierung bzw. einer Situation, in der die Energiepreise ab dem Sanierungszeitpunkt konstant bleiben. Selbstnutzer und Mieter wurden dabei separat analysiert und in fünf bzw. sechs Cluster eingeteilt.

Selbstnutzer

Durch die Investitionen in Gebäudehülle und Wärmeversorgungspakete ergibt sich bei drei der fünf Selbstnutzercluster keine Reduktion des Haushaltsnettoeinkommens abzüglich Energiekosten und der annuitätisch angesetzten Abnutzung der Investitionen. Unter diesen Clustern, die 73% der Selbstnutzerhaushalte umfassen, muss der mit durchschnittlich 70 Jahren älteste Cluster acht Nettomonatseinkommen investieren, und damit um mindestens 60% mehr als die anderen Cluster. Unter den zwei Clustern mit einer Verringerung des verbleibenden Einkommens verringert sich dieses bei dem mit 24% der Selbstnutzerhaushalte deutlich größeren Cluster um weniger als 0,5% des Haushaltsnettoeinkommens. Als kritisch kann daher auf den ersten Blick nur der verbleibende Cluster eingestuft werden, welcher nur 2% der Selbstnutzerhaushalte umfasst und bei dem ein um 212 €/ (Monat Person) verringertes verbleibendes Haushaltsnettoeinkommen resultiert. Die hohen Investitionen sind allerdings maßgeblich auf die angenommene Umstellung auf eine zentrale Wärmebereitstellung zurückzuführen, die in der Realität in diesen Fällen wohl nicht durchgeführt würde.

Auf eine übermäßige finanzielle Belastung mengenmäßig relevanter Selbstnutzerhaushalte ergeben sich daher trotz vereinzelter Investitionsbelastung oder Schlechterstellung keine Hinweise. Dies gilt auch bei einer Verkürzung der erwarteten Lebensdauer für die modernisierte Gebäudehülle auf 20 Jahre.

Mieter

Für keinen der sechs Mietercluster wird bei einer Modernisierungsumlage von 11% der umlagefähigen Investitionen im ersten Jahr der Sanierung Warmmietenneutralität erreicht. Daher sinkt das Haushaltsnettoeinkommen abzüglich

Warmmiete durch die Sanierung – in den Clustern, die mehr als 3% der Mieterhaushalte umfassen, um bis zu 3%. Zur Charakterisierung der betroffenen Haushalte wurden die sechs Mietercluster aussagekräftig²³⁷ als *Familien*, *Jüngere*, *Rentner*, *Gutverdiener*, *Bestverdiener* und *potenzielle Umrüster* bezeichnet. Die **Familien (21% der Mieterhaushalte)** sind, bezogen auf die Haushaltsgröße, die Einkommensschwächsten und verlieren durch die Sanierung 2% ihres Haushaltsnettoeinkommens abzüglich Warmmiete. Die **Jüngeren (33%)** und die **Rentner (35%)** entsprechen überwiegend Ein- und Zweipersonenhaushalten und werden mit einer Reduktion des Haushaltsnettoeinkommens abzüglich Warmmiete um 3% konfrontiert. Die **Gutverdiener (8%)** und die **Bestverdiener (<1%)** sind aus sozialer Perspektive von untergeordneter Bedeutung, insbesondere da sie maximal 1% ihres Einkommens abzüglich Warmmiete einbüßen. Bei den **potenziellen Umrüstern (3%)** wird für die Realität aufgrund zentralitäts- und energieträgerwechselbedingter hoher Investitionen nicht von der Umsetzung der Maßnahmen ausgegangen. Im Falle einer Umsetzung könnten die Mieter die Modernisierungsumlage allerdings nicht aufbringen. Im Falle eines Gebäudeabbruchs benötigten sie Ersatzwohnraum.

Bei den Mietern ergeben sich im Falle einer 11%-Umlage insgesamt deutliche Hinweise auf finanzielle Belastungen, sowohl von Familien als auch von Ein- und Zweipersonenhaushalten. Bei einer 5,5%-Umlage resultierte allerdings für alle Cluster mit Ausnahme der **potenziellen Umrüster** Warmmietenneutralität.

Einschränkungen

Bei der Analyse wurden Mittelwerte der zu den jeweiligen Clustern gehörenden Haushalte zur Argumentation herangezogen. Durch die Streuung innerhalb der Cluster kann die finanzielle Belastung von Clusterteilmengen deutlich höher sein als die Mittelwerte indizieren. Zudem wurden steigende Energiepreise ab dem Sanierungszeitpunkt nicht berücksichtigt. Diese führten zwar zu einer zunehmenden Besserstellung von Mietern und Selbstnutzern im Ver-

²³⁷ Vgl. Fußnote 235 bez. der verwendeten Namen.

gleich zur Unterlassungsalternative, aber die Haushalte würden zunehmend schlechtergestellt, sodass sich weitere problematische Konstellationen ergäben, auch wenn diese Entwicklungen durch die energetischen Modernisierungen teilweise gedämpft würden.

8.3.7 Lastenverschiebung

Wie können diese Hauptlasten verschoben werden, um die Transformation für Wohngebäudeeigentümer und -bewohner möglichst „zumutbar“ zu gestalten?

Da bei den Selbstnutzern im Szenario *Staatssicht 11* (bzw. *Staatssicht 11 MA*; vgl. Abschnitt 7.4.5) die Wirtschaftlichkeit überwiegend gegeben ist, kann bei diesen primär etwaige Illiquidität als „Hauptlast“ betrachtet werden. Um die Liquidität zu gewährleisten bzw. zu verbessern, könnten insbesondere entsprechende Kredite zur Verfügung gestellt und der Zugang zu diesen erleichtert werden. Eine Förderung ist dabei aus Perspektive dieser Forschungsfrage nicht notwendig.

Im Vergleich zu den Selbstnutzern werden Mieter im Szenario *Staatssicht 11* bei einer 11%-Umlage der umlagefähigen Investitionen direkt nach der Sanierung finanziell schlechtergestellt. Die Warmmiete steigt, insbesondere auch bei einkommensschwachen Mieterhaushalten. Durch eine Reduzierung der Modernisierungsumlage auf 5,5% ließe sich die Warmmietenneutralität zwar überwiegend erreichen, aber hierdurch würden die Vermieter schlechtergestellt. Die statische Amortisationszeit stiege für den Modernisierungsanteil der Investitionen von 9 auf 18 Jahre, läge aber noch unter der für die Wärmeversorgungspakete angesetzten Lebensdauer von 20 Jahren. Bei einer geforderten Verzinsung von 3% stiege die dynamische Amortisationszeit allerdings von 11 auf 27 Jahre. Im Falle reiner Wärmeversorgungspakete wäre die Investition aus Sicht des Vermieters daher zumindest kritisch zu hinterfragen. Eine Begrenzung der Modernisierungsumlage kann sich z. B. durch Mechanismen des Wohnungsmarktes oder aber auch durch die gesetzliche Veränderung der Obergrenze, bspw. durch Anpassung an die erwartete Lebensdauer der Inves-

tionsgüter, ergeben. Auch sukzessive mit den Energiepreisen steigende Modernisierungsumlagen wären eine Option. Als Ergänzung könnten insbesondere einkommensschwache Haushalte durch ggf. angepasste Transferleistungen des Staates entlastet werden. Bei steigenden Energiepreisen werden diese ohnehin zunehmend notwendiger, sofern die Einkommen nicht entsprechend wachsen.

8.3.8 Geeignete Bündel umweltpolitischer Instrumente

Welche Bündel umweltpolitischer Instrumente sind für den Bereich Wärmenutzung in Wohngebäuden geeignet, um die Treibhausgas- und Luftschadstoffemissionen sowie den Primärenergieverbrauch zu reduzieren?

Die Beurteilung der Eignung umweltpolitischer Instrumente basiert primär auf der nachhaltigkeitsorientierten Gesamtbewertung der ökonomischen und ausschöpfbaren Potenzialszenarien aus Staatssicht in Kapitel 7. Eine zentrale Annahme dabei ist, dass sich jeder Selbstnutzer einem der Entscheidertypen und jeder Vermieter einer der Entscheiderstrategien zuordnen lässt. Da veränderte Normierungsfunktionen, Normierungsgrenzen und Indikatorgewichtungen die Gesamtbewertung beeinflussen, sind die Ergebnisse nur als exemplarisch zu betrachten. Neben den Bewertungsergebnissen fließen zudem weitere Erkenntnisse aus den vorigen Abschnitten und Kapitel 7 ein.

Ordnungsrechtliche Instrumente und rechtlicher Rahmen

Das Szenario *Ausbesserer 11*, in dem nur ein Austausch der Wärmeversorgungspakete mit minimalen Investitionen nach Ablauf der technischen Lebensdauern und keine energetische Modernisierung der Gebäudehülle erfolgt, weist eine niedrigere Gesamtbewertung als das Szenario *Mindestmaßsanierer 9* auf. Da in Letzterem die Gebäudehülle und die Wärmeversorgungspakete gemäß EnEV 2009 modernisiert werden, bietet sich ein **Vollzug der Mindestanforderungen** an.

Da im Szenario *Mindestmaßsanierer 11*, in dem die Mindestanforderungen an Gebäudehülle und Wärmeerzeuger gemäß *EnEV 2009-50%* und dem obligato-

rischen Einsatz von Partikelabscheidern bei Holzpelletfeuerungen verschärft werden, eine noch bessere Bewertung resultiert, bietet sich auch eine entsprechende **Verschärfung der Mindestanforderungen** an. Der **obligatorische Einsatz von Partikelabscheidern bei Holzpelletfeuerungen** wird auch durch die bessere Bewertung des Szenarios *Ökomodernisierer 11* im Vergleich zum Szenario *Ökomodernisierer 11 W** gestützt. In diesen Szenarien wird von den Gebäudeeigentümern der nicht erneuerbare Primärenergieverbrauch mit bzw. ohne den Einsatz von Partikelabscheidern minimiert.

Das Szenario *KW11*, in dem mit Möglichkeit zur Umgehung der Mindestanforderungen gemäß Kapitalwert aus (bei Vermietern fiktiver) Selbstnutznersicht entschieden wird, weist eine höhere Bewertung auf als das Szenario *Mindestmaßsanierer 11*. Daher bietet sich eine **Anpassung der Mindestanforderungen an die im Szenario *KW11* umgesetzten Maßnahmenpakete** an. Da die Wirtschaftlichkeit von Maßnahmenpaketen auch vom Zustand der Gebäude vor der Sanierung abhängt, sollte der Zustand der Gebäude vor der Sanierung ggf. in die Mindestanforderungsspezifikation integriert werden.

Ökonomische Instrumente

Das Szenario *Staatssicht 11*, in dem jeder Entscheider eine Abweichung vom Maßnahmenpaket mit dem „besten“ Kapitalwert akzeptiert, falls dem eine hinreichende Reduktion der CO₂-Emissionen entgegensteht, weist eine höhere Gesamtbewertung auf als das Szenario *KW11*. Daher bietet sich eine **Förderung der im Szenario *Staatssicht 11* umgesetzten Maßnahmenpakete** an, sofern sich die Mindestanforderungen auf die wirtschaftlichsten Maßnahmenpakete beschränken sollen. Um diese Maßnahmenpakete auch für kapitalwertmaximierende Entscheider attraktiv zu machen und gleichzeitig die Überförderung gering zu halten, kann die Kapitalwertverschlechterung im Vergleich zum wirtschaftlichsten Maßnahmenpaket ggf. zuzüglich Anreizpauschale als Förderbetrag anvisiert werden. Durch die **Integration der Zustände vor und nach der Sanierung in die Förderpaketspezifikation** kann im Vergleich zur Situation ohne Berücksichtigung des Zustands vor der Sanierung bei vorgegebenen Förder-

ausgaben pro CO₂-Vermeidung die CO₂-Vermeidung stark erhöht werden. Eine exemplarische Ausgestaltung von 13 nach Zuständen vor und nach der Sanierung differenzierenden Förderpaketen verdeutlichte, dass im Vergleich zu einer exemplarischen, anteiligen, von der energetischen Qualität der Einzelmaßnahmen abhängigen Förderung die Förderausgaben pro CO₂-Vermeidung von über 330 €/t auf 70 €/t reduziert und die CO₂-Vermeidung gleichzeitig erhöht werden konnte. Analoges gilt für den Vergleich mit der betrachteten Variante der steuerlichen Abzugsfähigkeit energetischer Modernisierungen bei selbstnutzenden Eigentümern. Eine drastische Erhöhung der Energiepreise ist zwar tendenziell effektiver als die steuerliche Abzugsfähigkeit und die anteilige von der energetischen Qualität der Einzelmaßnahmen abhängige Förderung, aber wegen einer starken finanziellen Belastung aller Gebäudebewohner zumindest ohne Ausgleichsmaßnahmen ungeeignet.

Bei Selbstnutzern sollte eine **Anpassung von Förderart und Förderhöhe an die Charakteristika der zu Fördernden** erfolgen. Bspw. eignen sich Investitionszuschüsse für den Cluster der *Rentner*, zinsvergünstigte Darlehen für die *Jüngeren*, stark zinsvergünstigte Darlehen für die *Potenzialreichsten* und ggf. eine Übernahme des Kreditrisikos durch den Staat oder andere Akteure für die *Umweltsünder*. Eine Ausweitung des *Contracting* von den Wärmeversorgungspaketen auf die Gebäudehülle könnte die Erschließung der Potenziale bei dem Cluster der selbstnutzenden *Wenigverdiener* ermöglichen.

Zum Schutz einkommensschwacher Mieter kann eine Begrenzung der Modernisierungumlage zum Erhalt der Warmmietenneutralität, ggf. mit sukzessiver Erhöhung in Abhängigkeit vom Energiepreisanstieg, zweckmäßig sein. Anpassungen bei Regelungen zum Wohngeld könnten die Zulässigkeit beliebiger Kaltmieten bei derselben Warmmiete betreffen, um den modernisierungsbedingten Umzug einkommensschwacher Haushalte zu verhindern. Bei steigenden Energiepreisen werden zudem in zunehmendem Maße Transferleistungen zur Entlastung einkommensschwacher Haushalte notwendig.

Suasorische Instrumente

Da die Entwicklungspfade des Gebäudebestands auf veränderte Entscheidungsansätze sensitiver reagieren als auf Variationen der in *AWOHH* direkt modellierten Instrumente, sollten Verschiebungen zwischen den Entscheidertypen und -strategien neben dem Vollzug der Mindestanforderungen durch entsprechende **Informations- und Überzeugungskampagnen** anvisiert werden. Diese sollten u. a. auf **vermehrte Entscheidungen gemäß Kapitalwert**, eine **erhöhte Akzeptanz von warmmietenneutralen Kaltmietensteigerungen und der EnEV**, eine **erhöhte Inanspruchnahme von Förderprogrammen** sowie **Transparenz bezüglich umweltfreundlicher und vermeintlich umweltfreundlicher Maßnahmenpakete** abzielen. Bei der konkreten Ausgestaltung dieser Kampagnen sollten dabei die Charakteristika der jeweiligen Zielgruppen, insbesondere des Clusters der *Potenzialreichsten* bei den Mietern und Selbstnutzern, berücksichtigt werden.

8.4 Ausblick auf zukünftige Forschungsarbeiten

Im Folgenden wird ein Ausblick auf potenzielle zukünftige Forschungsarbeiten im Zusammenhang mit dem entwickelten Modell gegeben.

Modellanwendung

Eine Intensivierung der Unsicherheitsanalyse der dynamischen Bestandsentwicklung und der multivariaten Analysen der Modellergebnisse ermöglicht die weitere Überprüfung der Stabilität der abgeleiteten Aussagen. Dabei sollten neben den Realisationen von Zufallsvariablen auch die sonstigen unsicheren Parameter und die Entscheidungsansätze systematisch variiert und Auswirkungen ausgewertet werden. Das entwickelte Modell ermöglicht durch eine Variation der Entscheidungsansätze insbesondere auch eine verstärkte Analyse der Wechselwirkungen zwischen Vermietern und Mietern, die in der vorliegenden Arbeit aber nur in begrenztem Umfang durchgeführt wurde.

Aktualisierung und Verfeinerung der Datenlage

Der Übergang zu einer aktuelleren Version der Hauptdatenquelle – des *Scientific-Use-File* des Mikrozensus – vom Erhebungsjahr 2006 auf das Jahr 2010 würde die Unsicherheiten der abgeleiteten Aussagen verringern. Eine Anpassung der Modellstruktur, die eine kombinierte Verwendung von Mikrozensus 2010 und Zensus 2011 ermöglichen würde, könnte diese Unsicherheiten noch weiter reduzieren. Das *Scientific-Use-File* des Mikrozensus 2010 sowie der Zensus 2011 waren erst kurz vor Abschluss dieser Arbeit verfügbar und wurden daher nicht detailliert berücksichtigt.

Der Wechsel zu den Energieträgern Gas und Solarstrahlung nimmt unter den Ergebnissen insbesondere in Hinsicht auf die technischen Potenziale eine zentrale Rolle ein, sodass eine detaillierte räumliche Differenzierung von Gasverfügbarkeit und Solarstrahlung sowie eine Analyse der Dachflächen die Einschränkungen der Aussagen reduzieren könnten. Ähnliches gilt für den Energieträger Nah- bzw. Fernwärme. Die gemeindescharfen Ergebnisse des Zensus 2011 bilden hierfür einen guten Anknüpfungspunkt. Darüber hinaus reduzierte die Integration weiterer Daten zu den energetischen Eigenschaften des Wohngebäudebestands, zur Sanierungsentscheidung und zur Haushaltsentwicklung die Unsicherheiten der abgeleiteten Aussagen. Eine Einbindung von Vertretern der Exekutive, Legislative und Förderer könnte eine Anpassung des Bewertungsansatzes aus Staatssicht, d. h. der Indikatorauswahl, -normierung und -gewichtung, an die konkreten Bedürfnisse dieser Akteure ermöglichen.

Erweiterung der Systemgrenzen

Bisher liegen Nebenfeuerstätten sowie Möglichkeiten zur Reduzierung des Elektrizitätsbedarfs und zur Elektrizitätsproduktion innerhalb des Gebäudes außerhalb der Systemgrenzen. Deren Integration in das betrachtete System würde eine Betrachtung der gesamten Energienutzung im Gebäude ermöglichen. Somit könnten bspw. auch Konzepte wie „Nullenergiehäuser“ berücksichtigt werden. Weitere Möglichkeiten zur Systemgrenzenerweiterung sind

die Simulation des Verhaltens von Energieversorgern und anderen Dienstleistern, die Berücksichtigung von Wechselwirkungen mit den Energieversorgungssystemen, die detailliertere Berücksichtigung des Neubaus sowie die verstärkte Berücksichtigung von Vorketten. Auch die Einbeziehung weiterer Technologien sowie des technischen Fortschritts könnten weitere interessante Erkenntnisse ermöglichen. Teilweise wären die Erweiterungen durch die erneute Integration der weiterentwickelten Teilmodelle des otello-Modellsystems möglich.

9. Zusammenfassung

Die Wärmenutzung in Wohngebäuden bedingt einen beträchtlichen Teil des Ressourcenverbrauchs, der Luftschadstoff- und Treibhausgasemissionen sowie der Ausgaben privater Haushalte. Deshalb gilt die Verdopplung der energetischen Sanierungsrate auf 2% p. a. als zentraler Beitrag zu den energiepolitischen Kernzielen Umweltschutz, Versorgungssicherheit und wirtschaftliche Vertretbarkeit (vgl. Bundeskabinett 2010). Die notwendige Anpassung umweltpolitischer Instrumente, wie der Energieeinsparverordnung (EnEV), entspricht einem multikriteriellen Entscheidungsproblem, bei dessen Lösung Wohngebäudebestandsmodelle durch die Simulation potenzieller Entwicklungspfade des Gebäudebestands unterstützen können.

Ziel der vorliegenden Arbeit ist die Entwicklung und Anwendung einer Methodik zur Identifizierung und Konzipierung adäquater Bündel umweltpolitischer Instrumente im Themenfeld Wärmenutzung in Wohngebäuden mit Fokus auf der energetischen Modernisierung. Dabei sollen drei gravierende Defizite existierender Wohngebäudebestandsmodelle beseitigt werden, die im Rahmen dieser Arbeit als Forschungslücke herausgearbeitet werden.

Erstens bleiben Eigentümer und Bewohner von Gebäuden bisher weitgehend unberücksichtigt, obwohl diese, wie empirische Befunde zeigen, einerseits entscheidenden Einfluss auf Sanierungsrate und -pakete nehmen und andererseits für die wirtschaftliche und soziale Vertretbarkeit von Entwicklungspfaden des Gebäudebestands maßgeblich sind. Zweitens konzentriert sich die Bewertung von Entwicklungspfaden des Gebäudebestands meist auf CO₂-Emissionen, Primärenergieverbrauch, Investitionen sowie Energiekosten und lässt weitere Nachhaltigkeitsaspekte wie Luftschadstoffemissionen sowie deren räumliche Verteilung, finanzielle Umverteilungswirkungen sowie Überlastungen einkommensschwacher Haushalte außer Acht. Drittens erfordern existierende Modelle die Vorgabe von Instrumentenbündeln bzw. von deren Struktur als Modelleingangsgröße. Vorschläge für eine Neu- bzw. Umgestaltung von Instrumenten, die auf modellendogen bestimmten Potenzialen und Hemmnis-

sen basieren, werden daher nicht ermöglicht, wie bspw. eine Zielgruppenanpassung von Instrumentenbündeln.

Im Rahmen dieser Arbeit wird erstmals ein **akteursbasiertes Wohngebäude- und Haushaltsmodell (AWOHHM)** für den Bereich Wärmenutzung entwickelt, das auf Mikroebene die Simulation von Entwicklungspfaden des Wohngebäude- und Haushaltsbestands in Deutschland bei unterschiedlichen Bündeln umweltpolitischer Instrumente bis zum Jahr 2030 ermöglicht. Basis hierfür ist eine Stichprobe von ca. 227.000 Haushalten und Wohnungen. Die räumliche Auflösung des Modells reicht bis zur Gemeindeebene. Durch die integrierte Abbildung von Gebäuden und Haushalten können erstmals sowohl Haushaltscharakteristika, welche die Sanierungsentscheidung beeinflussen, als auch die Auswirkungen von Sanierungen vor dem Hintergrund der tatsächlichen Wohnsituation berücksichtigt werden. Haushaltsveränderungen, die bspw. aus Todesfällen, Geburten und Umzügen resultieren, werden hierfür u. a. durch Zufallsziehungen gemäß an der amtlichen Statistik angelehnten Wahrscheinlichkeitsverteilungen bzw. durch mit diesen Daten parametrisierte Regressionsmodelle berücksichtigt. Gebäudeeigentümer, d. h. Selbstnutzer und Vermieter, werden als individuelle nutzenmaximierende Akteure modelliert, die Sanierungsentscheidungen hinsichtlich Gebäudehülle und Wärmeversorgungspaket gemäß annahmenbasierten oder empirisch fundierten Nutzenfunktionen treffen. Durch die Variation der Nutzenfunktionen und deren Zuordnung zu konkreten Entscheidern im Rahmen von Szenarien können technische, ökonomische und ausschöpfbare Reduktionspotenziale für den Energieverbrauch sowie für Emissionen an Treibhausgasen (CO₂, CH₄) und Luftschadstoffen (NO_x, SO₂, NMVOC, PM) abgeschätzt werden. Speziell für die ausschöpfbaren Potenziale – definiert als der Teil der ökonomischen Potenziale, der in der Realität genutzt werden kann – werden die Entscheidertypen *Ausbesserer*, *Mindestmaßsanierer*, *Ökonom* und *Ökomodernisierer* sowie die Entscheiderstrategien *Abbruchstrategie*, *Substanzerhaltungsstrategie Basis* und *Erweitert, langfristige Modernisierungsstrategie* sowie *Ökomodernisierungsstrategie* –

jeweils mit Nutzenfunktionen – definiert, um das Investitionsverhalten der Selbstnutzer und Vermieter zu typisieren. Neben ordnungsrechtlichen und ökonomischen Instrumenten können mit *AWOHM* durch Verschiebungen zwischen den Entscheidertypen/-strategien insbesondere auch suasorische Instrumente abgebildet werden. Leerstand und Abriss von Gebäuden werden in *AWOHM* modellendogen bestimmt, der Neubau exogen vorgegeben.

Um simulierte Gebäudebestandsentwicklungspfade und damit vorgegebene umweltpolitische Instrumentenbündel unter Berücksichtigung von Synergien und Konflikten aus Staatssicht bewertbar zu machen bzw. Vor- und Nachteile herauszustellen, wird ein multikriterieller Bewertungsansatz angewandt. Dabei wird in Anlehnung an die deutsche Nachhaltigkeitsstrategie ein spezieller, für den Bereich Wärmenutzung in Wohngebäuden und die Modellstruktur geeigneter, Indikatorenansatz definiert. Hervorzuheben ist, dass bspw. Luftschadstoffemissionen auf Gemeindeebene bestimmt werden und durch räumlich-zeitliche Aggregationsverfahren in die aggregierte Bewertung eingehen.

Da diese starre Bewertung allerdings (a priori) die Vorgabe konkreter Instrumentenbündel erfordert, werden zudem die Clusteranalyse nutzende Ansätze entwickelt, die basierend auf den auf Mikroebene simulierten Modellergebnissen die hemmnis- und potenzialgetriebene Ausgestaltung von Instrumenten ermöglichen. Ausgehend von der technischen Gebäudespezifikation und dem ökonomischen Emissionsreduktionspotenzial können dabei durch die Bündelung ähnlicher Gebäude homogene Mindestanforderungspakete und Förderpakete mit hohem Reduktionspotenzial und niedriger Überförderung identifiziert werden. Zudem lassen sich Gebäude-Haushalts-Konstellationen erkennen, die sich hinsichtlich ihrer Eignung für bestimmte Instrumente ähneln, und Instrumentenbündel für diese Zielgruppen zusammenstellen. Des Weiteren können auch Haushaltscluster mit übermäßiger finanzieller Belastung und die Notwendigkeit von Ausgleichsmaßnahmen identifiziert werden.

Da die mittels *AWOHM* abgeleiteten Ergebnisse mit Unsicherheiten einhergehen, werden Letztere typisiert und die Ergebnisse mithilfe von *Monte-Carlo*

Simulationen und Szenarien plausibilisiert. Es zeigt sich u. a., dass die Unsicherheiten von Kenngrößen auf Mikroebene zwar groß, diejenigen ihrer Häufigkeitsverteilungen allerdings gering sind. Zudem geht eine Erhöhung der räumlichen Auflösung mit einer Zunahme der Unsicherheiten einher.

Das **technische Reduktionspotenzial** im Bereich Wärmenutzung in Wohngebäuden von 2006 bis 2030 steigt von den CH₄-Emissionen (-4%) über Endenergieverbrauch, gesamten sowie nicht erneuerbaren Primärenergieverbrauch (41%-43%) und CO₂-Emissionen (49%) bis zu den Luftschadstoffemissionen (71-85%) an (jeweils und im Folgenden direkte Emissionen). Das **ökonomische Potenzial** ist bei Mindestanforderungen gemäß *EnEV 2009-50%* bereits ohne Förderung mit Ausnutzungsgraden von mindestens 59% in Bezug auf das technische Potenzial vielversprechend. Unter *EnEV 2009-50%* sind um ca. 50% reduzierte Wärmedurchgangskoeffizienten im Vergleich zur EnEV 2009 bei der Sanierung, erhöhte Anforderungen an die Wärmeerzeuger (Verbot von Holzpelletkesseln ohne Partikelabscheider u. a. Wärmeerzeugern) und erhöhte Anforderungen an den Neubau zu verstehen. Für CO₂ (inkl. Emissionen aus Biomasse) können die in *AWOHH* abgebildeten Varianten von Investitionszuschüssen und der steuerlichen Abzugsfähigkeit energetischer Modernisierungen den Ausnutzungsgrad bei mittleren Förderausgaben pro CO₂-Vermeidung von über 330 €/t von 75% auf 78-80% steigern. Der zur Förderpaketgestaltung entwickelte Ansatz ermöglicht allerdings bei 13 Förderpaketen mit (niedrigeren) mittleren Förderausgaben von 70 €/t einen (höheren) Ausnutzungsgrad von ca. 84%. Bedingt wird diese Verbesserung durch Differenzierung der Förderpakete nach dem Gebäudezustand vor der Sanierung.

Das größte **ausschöpfbare Reduktionspotenzial** ergibt sich unter den betrachteten Instrumentenbündeln bei Mindestanforderungen gemäß *EnEV 2009-50%* (für CO₂ inkl. Emissionen aus Biomasse und NO_x in Kombination mit einer Erhöhung der Energiepreise um 50%). Die Reduktion steigt dabei von NO_x (9%) über CO₂ inkl. Emissionen aus Biomasse (16%), Endenergie und gesamte Primärenergie (19-21%), nicht erneuerbare Primärenergie und CO₂ exkl. Emis-

onen aus Biomasse (26%) sowie SO₂ (29%) bis zu PM, CH₄ und NMVOC (52-62%). Gebäudeeigentümer werden dabei den Entscheidertypen/-strategien u. a. basierend auf den sozio-demographischen Eigenschaften der Bewohner zugeordnet. Da die Emissions- und Energieverbrauchsreduktionen zwischen den Entscheidertypen/-strategien deutlich größere Schwankungen aufweisen als bei reiner Variation der umweltpolitischen Instrumente, wären gezielte Verschiebungen zwischen den Entscheidertypen/-strategien vielversprechend, um die Lücke zum ökonomischen Reduktionspotenzial zu verringern. Dieses wird teilweise beträchtlich verfehlt, so z. B. um 10% bzw. 21% bei CO₂ exkl. bzw. inkl. Emissionen aus Biomasse, 12% bei PM, 35% bei NO_x und 41% bei SO₂ (jeweils Anteil der Emissionen im Jahr 2006). Erreicht werden könnte eine derartige Verschiebung durch die Anpassung von Instrumenten an die betroffenen Akteure sowie in *AWOHHM* nicht direkt abgebildete Instrumente wie bspw. den Vollzug der Mindestanforderungen.

Das Szenario *Staatssicht 11*, in dem alle Eigentümer gemäß einem Kompromiss aus Wirtschaftlichkeit und Umweltschutz entscheiden, ermöglicht über das ökonomische Reduktionspotenzial hinausgehende Reduktionen. Es führt zudem zum höchsten Gesamtnutzen aus Staatssicht, welcher auf Teilnutzen in den Dimensionen *Generationengerechtigkeit*, *Lebensqualität* und *sozialer Zusammenhalt* basiert, die wiederum auf eine Vielzahl von Indikatoren zurückgeführt werden. Um den Gebäudebestandsentwicklungspfad dieses Szenarios durch die **Zielgruppenadaption umweltpolitischer Instrumente** zu unterstützen, werden Selbstnutzer und Mieter jeweils in sieben Cluster eingeteilt und die Cluster aussagekräftig benannt. Die CO₂-Vermeidungspotenziale verteilen sich bei den Selbstnutzern auf die *Potenzialreichsten* (30%), *Umweltsünder* (22%), *Akademiker* (13%), *Rentner* (13%), *Jüngeren* (11%), *Wenigverdiener* (9%) sowie die *Gutverdiener* (1%) und bei den Mietern auf die *Potenzialreichsten* (46%), *Rentner* (15%), *Jüngeren* (14%), *Wenigverdiener* (10%), *Gutverdiener* (9%), *Bestverdiener* (5%) sowie die *potenziellen Umrüster* (3%). Für jeden

dieser Cluster werden vor dem Hintergrund der Clustereigenschaften geeignete umweltpolitische Instrumente diskutiert.

Eine Analyse der Haushalte auf **drohende „soziale Brennpunkte“** im Szenario *Staatssicht 11* ergibt trotz einzelner Investitionsbelastung oder Schlechterstellung keine Hinweise auf eine übermäßige finanzielle Belastung mengenmäßig relevanter Selbstnutzerhaushalte. Der Fokus liegt dabei auf der Situation direkt nach der Sanierung bzw. einer Situation, in der die Energiepreise ab dem Sanierungszeitpunkt konstant bleiben. Bei den Mietern wird deutlich, dass im Falle einer 11%-Umlage sowohl Familien als auch Ein- und Zweipersonenhaushalte finanziell belastet werden. Bei einer 5,5%-Umlage ist dahingegen großteils Warmmietenneutralität erreichbar. Allerdings werden hierdurch die Vermieter schlechtergestellt.

Insgesamt wird mittels *AWOHM* ein vielversprechendes **Bündel aus ordnungsrechtlichen, ökonomischen und suasorischen Instrumenten** zusammengestellt. Dieses basiert auf der zentralen Annahme, dass sich jeder Selbstnutzer einem Entscheidertypen und jeder Vermieter einer Entscheiderstrategie zuordnen lässt. Durch den Vollzug und die Verschärfung der Mindestanforderungen gemäß *EnEV 2009-50%* kann der Gesamtnutzen aus Staatssicht jeweils erhöht werden. Eine Anpassung der Mindestanforderungen an die aus Eigentümer-sicht wirtschaftlichsten Maßnahmenpakete führt zu einer weiteren Verbesserung. Förderungen können die Maßnahmenpakete des Szenarios *Staatssicht 11*, die zu einem maximalen Gesamtnutzen führen, ökonomisch attraktiv machen. Um die Überförderung gering zu halten, sollte sich die Förderhöhe an der Kapitalwertverschlechterung im Vergleich zum wirtschaftlichsten Maßnahmenpaket orientieren und der Zustand der Gebäude vor der Sanierung bei der Förderpaketspezifikation berücksichtigt werden. Bei Selbstnutzern sollten Förderart und Förderhöhe an die Charakteristika der zu Fördernden angepasst werden. So eignen sich bspw. Investitionszuschüsse für den Cluster der *Rentner*; zinsvergünstigte Darlehen für die *Jüngeren*, stark zinsvergünstigte Darle-

hen für die *Potenzialreichsten* und ggf. eine Übernahme des Kreditrisikos durch den Staat oder andere Akteure für die *Umweltsünder*.

Zum Schutz einkommensschwacher Mieter kann eine ggf. sukzessive steigende Begrenzung der Modernisierungsumlage zum Erhalt der Warmmietenneutralität zweckmäßig sein. Beim Wohngeld könnten zudem beliebige Kaltmieten bei derselben Warmmiete zugelassen werden, um den modernisierungsbedingten Umzug einkommensschwacher Haushalte zu verhindern. Bei steigenden Energiepreisen werden zudem in zunehmendem Maße Transferleistungen zur Entlastung einkommensschwacher Haushalte notwendig. Informations- und Überzeugungskampagnen sollten u. a. auf vermehrte Entscheidungen gemäß Kapitalwert, eine erhöhte Akzeptanz von warmmietenneutralen Kaltmietensteigerungen und der EnEV, eine erhöhte Inanspruchnahme von Förderprogrammen sowie Transparenz abzielen. Bei der konkreten Ausgestaltung dieser Kampagnen sollten die Charakteristika der jeweiligen Zielgruppen, bspw. der Cluster der *Potenzialreichsten* bei Mietern und Selbstnutzern, berücksichtigt werden.

Neben den Handlungsempfehlungen für eine zielgerichtete Energiepolitik im Bereich Wärmenutzung in Wohngebäuden liegt der **originäre Beitrag** der vorliegenden Arbeit in der Entwicklung eines aktorsbasierten Wohngebäude- und Haushaltsmodells, das Simulation und Nachhaltigkeitsbewertung plausibler und konsistenter Entwicklungspfade des Gebäude- und Haushaltsbestands in Abhängigkeit von Bündeln umweltpolitischer Instrumente unter Berücksichtigung von Unsicherheiten ermöglicht. Darüber hinaus werden auf der Clusteranalyse basierende Ansätze zur Um- und Ausgestaltung umweltpolitischer Instrumente entwickelt, die den auf Mikroebene simulierten Modellinput und -output nutzen.

A Anhang

A.1 Ausgewählte Daten zu AWOHM

Tabelle 131: Instanzen der Klasse *Stammdaten Wärmeerzeuger* (Auszug der Merkmale; Datengrundlage: vgl. Tabelle 27); *: Preisstand 2006 mit 19% Mehrwertsteuer; BKB: Braunkohlebriketts

Beschreibung	Leistungs- klasse [-]	Jahres- nutzungs- grad [-]	Direkte Emissionsfaktoren										Investition* [€]	Modernisie- rungsanteil [€/€]	Quali- täts- stufe [-]
			CO ₂ [t/TJ]	NO _x [kg/TJ]	SO ₂ [kg/TJ]	VOC [kg/TJ]	CH ₄ [kg/TJ]	NM VOC [kg/TJ]	PM [kg/TJ]						
Gas-Gasbrenner ohne Gebläse (Heiz- kessel)	1	0,9	55,796	22	0,5	1,5	1,4	0,03	3362	0,05	2				
Gas-Gasbrenner ohne Gebläse (Heiz- kessel)	2	0,9	55,796	36	0,5	0,71	0,09	0,03	5733	0,05	2				
Gas-Gasbrenner ohne Gebläse (Heiz- kessel)	3	0,9	55,796	38	0,5	0,71	0,09	0,03	19799	0,05	2				
Gas-Brennwertgerät	1	1	55,796	5,1	0,5	9,3	12	0,34	5053	0,38	3				
Gas-Brennwertgerät	2	1	55,796	5,1	0,5	9,3	12	0,34	7027	0,23	3				
Gas-Brennwertgerät	3	1	55,796	5,1	0,5	9,3	12	0,34	27719	0,34	3				
Gas-Gasbrenner mit Gebläse (Heiz- kessel)	1	0,9	55,796	19	0,5	0,38	0,04	0,03	3362	0,05	2				
Gas-Gasbrenner mit Gebläse (Heiz- kessel)	2	0,9	55,796	23	0,5	0,38	0,04	0,03	5733	0,05	2				
Gas-Gasbrenner mit Gebläse (Heiz- kessel)	3	0,9	55,796	26	0,5	0,38	0,04	0,03	19799	0,05	2				
Gas-Raumheizer	1	0,9	55,796	31	0,5	0,3	0,08	0,24	1190	0,05	1				
Gas-Durchlaufwasserheizer	1	0,9	55,796	39	0,5	1,2	1,2	0,29	1190	0,05	1				
Gas-Kombiwasserheizer	1	0,9	55,796	18	0,5	2	0,54	1,6	1190	0,05	1				
Gas-Vorratswasserheizer	1	0,8	55,796	54	0,5	0,92	0,34	0,66	1190	0,05	1				
Öl-Heizkessel mit Ölgebläsebrenner	1	0,9	73,344	40	60	2,5	0,02	2,5	3362	0,05	2				
Öl-Heizkessel mit Ölgebläsebrenner	2	0,9	73,344	43	60	1,9	0,07	1,8	5733	0,05	2				
Öl-Heizkessel mit Ölgebläsebrenner	3	0,9	73,344	42	60	1,2	0,02	0,11	19799	0,05	2				
Öl-Brennwertgerät	1	1	73,344	40	2	2,5	0,02	2,5	0,1	5053	0,38	3			
Öl-Brennwertgerät	2	1	73,344	43	2	1,9	0,07	1,8	0,1	207719	0,23	3			
Öl-Brennwertgerät	3	1	73,344	42	2	0,12	0,02	0,11	0,1	72719	0,34	3			
Öl-Öfen mit Verdampfungsbrenner	1	0,9	73,344	34	60	1,3	0,15	1,2	2,2	3362	0,05	1			

Beschreibung	Leistungs- klasse [-]	Jahres- nutzungs- grad [-]	Direkte Emissionsfaktoren						CH ₄ [kg/J]	NMVOC [kg/J]	PM [kg/J]	Investition* [€]	Modernisie- rungsanteil [€/€]	Quali- täts- stufe [-]
			CO ₂ [t/J]	NO _x [kg/J]	SO ₂ [kg/J]	VOC [kg/J]	CO [kg/J]	PM ₁₀ [kg/J]						
Öl-Öfen mit Verdampfungsbrenner	2	0,9	73,344	34	60	1,3	0,15	1,2	2,2	5733	0,05	1		
Öl-Öfen mit Verdampfungsbrenner	3	0,9	73,344	34	60	1,3	0,15	1,2	2,2	19799	0,05	1		
Holz-Heizkessel handbeschickt	1	0,8	102,108	124	5,1	19	7,7	1,3	90	-	0	0		
Holz-Heizkessel handbeschickt	2	0,8	102,108	81	5,1	49	19	3,4	52	-	0	0		
Holz-Heizkessel handbeschickt	3	0,8	102,108	86	5,1	80	32	5,6	63	-	0	0		
Holz-Heizkessel für Pellets	1	0,9	102,108	81	5,1	3,8	1,5	2,7	23	20825	0,85	1		
Holz-Heizkessel für Pellets	2	0,9	102,108	84	5,1	3,6	1,4	2,5	13	27801	0,8	1		
Holz-Heizkessel für Pellets	3	0,9	102,108	99	5,1	1,1	0,45	0,8	32	68723	0,73	1		
Holz-Heizkessel für Pellets mit Parti- kelabscheider	1	0,9	102,108	81	5,1	3,8	1,5	2,7	5,75	22625	0,86	3		
Holz-Heizkessel für Pellets mit Parti- kelabscheider	2	0,9	102,108	84	5,1	3,6	1,4	2,5	3,25	29601	0,82	3		
Holz-Heizkessel für Pellets mit Parti- kelabscheider	3	0,9	102,108	99	5,1	1,1	0,45	0,8	8	83323	0,77	3		
Holz-Dauerbrandöfen	1	0,7	102,108	61	4,4	443	226	273	74	-	0	0		
Holz-Kachelöfen	1	0,7	102,108	58	9,2	364	125	270	125	-	0	0		
Holz-Kamine	1	0,7	102,108	75	7	153	136	51	146	-	0	0		
Holz-Kaminöfen	1	0,7	102,108	65	9	281	136	179	106	-	0	0		
Holz-Pelletöfen	1	0,7	102,108	185	5,1	7,7	3,1	5,4	57	-	0	0		
Steinkohle-Dauerbrandöfen	1	0,8	95,93	59	393	175	140	70	18	-	0	0		
Steinkohle-Kachelöfen	1	0,8	95,93	75	408	58	47	23	18	-	0	0		
Steinkohle-Heizkessel	1	0,8	95,93	69	129	137	110	55	18	-	0	0		
Steinkohle-Heizkessel	2	0,8	95,93	88	343	114	92	46	18	-	0	0		
Steinkohle-Heizkessel	3	0,8	95,93	88	343	114	92	46	18	-	0	0		
Steinkohle-Dauerbrandöfen	1	0,8	106,167	29	435	8	4,3	4,7	17	-	0	0		
Steinkohle-Kachelöfen	1	0,8	106,167	36	488	1,3	0,69	0,78	17	-	0	0		
Steinkohle-Kachelöfen	1	0,8	106,167	72	481	68	36	41	15	-	0	0		
Steinkohle-Kachelöfen	2	0,8	106,167	72	481	68	36	41	15	-	0	0		
Steinkohle-Kachelöfen	3	0,8	106,167	72	481	68	36	41	15	-	0	0		
Steinkohle-Kachelöfen	1	0,8	95,457	50	563	460	368	184	265	-	0	0		
BK&B-Rheinisch-Dauerbrandöfen	1	0,8	97,01	84	80	525	260	330	243	-	0	0		
BK&B-Rheinisch-Kachelöfen	1	0,8	97,01	70	62	175	47	140	72	-	0	0		
BK&B-Rheinisch-Kamine	1	0,8	97,01	106	74	65	47	30	29	-	0	0		
BK&B-Rheinisch-Kaminöfen	1	0,8	97,01	88	69	124	47	89	74	-	0	0		
BK&B-Rheinisch-Heizkessel	1	0,8	97,01	111	109	285	152	171	130	-	0	0		

Beschreibung	Leistungs- klasse [-]	Jahres- nutzungs- grad [-]	Direkte Emissionsfaktoren						Indirekte Emissionsfaktoren				Investition* [€]	Modernisie- rungsanteil [€/€]	Quali- täts- stufe [-]
			CO ₂ [kg/TJ]	NO _x [kg/TJ]	SO ₂ [kg/TJ]	VOC [kg/TJ]	CH ₄ [kg/TJ]	NM VOC [kg/TJ]	PM [kg/TJ]	CO ₂ [kg/TJ]	NO _x [kg/TJ]	SO ₂ [kg/TJ]			
BKB-Rheinisch-Heizkessel	2	0,8	97,01	73	68	285	152	130	-	0	0	0	0	0	0
BKB-Rheinisch-Heizkessel	3	0,8	97,01	111	68	285	152	130	-	0	0	0	0	0	0
BKB-Lausitz-Dauerbrandöfen	1	0,8	97,01	42	259	302	51	264	125	-	-	-	-	-	0
BKB-Lausitz-Kachelöfen	1	0,8	97,01	55	156	519	51	481	99	-	-	-	-	-	0
BKB-Lausitz-Kamine	1	0,8	97,01	117	68	36	29	13	13	-	-	-	-	-	0
BKB-Lausitz-Kaminöfen	1	0,8	97,01	117	68	36	29	13	13	-	-	-	-	-	0
BKB-Lausitz-Heizkessel	1	0,8	97,01	84	325	173	262	295	40	-	-	-	-	-	0
BKB-Lausitz-Heizkessel	2	0,8	97,01	67	325	173	262	295	40	-	-	-	-	-	0
BKB-Lausitz-Heizkessel	3	0,8	97,01	84	306	491	262	295	40	-	-	-	-	-	0
BKB-Böhmisch-Dauerbrandöfen	1	0,8	97,01	42	259	302	51	264	369	-	-	-	-	-	0
BKB-Böhmisch-Kachelöfen	1	0,8	97,01	55	156	519	51	481	385	-	-	-	-	-	0
BKB-Böhmisch-Kamine	1	0,8	97,01	117	68	36	29	13	326	-	-	-	-	-	0
BKB-Böhmisch-Kaminöfen	1	0,8	97,01	117	68	36	29	13	326	-	-	-	-	-	0
BKB-Böhmisch-Heizkessel	1	0,8	97,01	84	325	173	262	295	140	-	-	-	-	-	0
BKB-Böhmisch-Heizkessel	2	0,8	97,01	67	325	173	262	295	140	-	-	-	-	-	0
BKB-Böhmisch-Heizkessel	3	0,8	97,01	84	306	491	262	295	140	-	-	-	-	-	0
Strom-Dezentrale WW-Bereitung	1	0,95	0	0	0	0	0	0	0	119	0	0	0	0	1
Strom-Dezentrale Raumwärme	1	0	0	0	0	0	0	0	0	119	0	0	0	0	1
Strom-Zentral	4	0,95	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Solarthermie-Flach	1	1	0	0	0	0	0	0	0	5724	1	0	0	0	3
Solarthermie-Flach	2	1	0	0	0	0	0	0	0	8556	1	0	0	0	3
Solarthermie-Flach	3	1	0	0	0	0	0	0	0	22712	1	0	0	0	3
Solarthermie-Röhren	1	1	0	0	0	0	0	0	0	5724	1	0	0	0	3
Solarthermie-Röhren	2	1	0	0	0	0	0	0	0	8556	1	0	0	0	3
Solarthermie-Röhren	3	1	0	0	0	0	0	0	0	22712	1	0	0	0	3
Fernwärme-Übergabestation schlecht gedämmt	1	0,9	0	0	0	0	0	0	0	-	0	0	0	0	0
Fernwärme-Übergabestation schlecht gedämmt	2	0,9	0	0	0	0	0	0	0	-	0	0	0	0	0
Fernwärme-Übergabestation schlecht gedämmt	3	0,9	0	0	0	0	0	0	0	-	0	0	0	0	0
Fernwärme-Übergabestation gut gedämmt	1	0,95	0	0	0	0	0	0	0	2700	0,05	0	0	0	3
Fernwärme-Übergabestation gut gedämmt	2	0,95	0	0	0	0	0	0	0	5240	0,05	0	0	0	3

Beschreibung	Leistungs- klasse [-]	Jahres- nutzungs- grad [-]	Direkte Emissionsfaktoren						Investition* [€]	Modernisie- rungsanteil [€/€]	Quali- täts- stufe [-]
			CO ₂ [t/J]	NO _x [kg/J]	SO ₂ [kg/J]	VOC [kg/J]	CH ₄ [kg/J]	NMVOG [kg/J]			
Fernwärme-Übergabestation gut gedämmt	3	0,95	0	0	0	0	0	0	14010	0,05	3
Monovalente elektrische Wärme- pumpe	1	3,5	0	0	0	0	0	0	-	0,05	3
Monovalente elektrische Wärme- pumpe	2	3,5	0	0	0	0	0	0	-	0,05	3
Monovalente elektrische Wärme- pumpe	3	3,5	0	0	0	0	0	0	-	0,05	3

Tabelle 132: Instanzen der Klasse *energetische Stammdaten* (Auszug der Merkmale; Datengrundlage: vgl. Tabelle 19)

ID	Kürzel	Baualtersklas- se [a]	Behetzte Wohnfläche [m ²]	Anzahl Wohn- heiten [Wohn- heiten]	CO ₂ [t/J]	NO _x [kg/J]	SO ₂ [kg/J]	VOC [kg/J]	CH ₄ [kg/J]	NMVOG [kg/J]	PM [kg/J]	Investition* [€]	Modernisie- rungsanteil [€/€]	Quali- täts- stufe [-]
1	RH.B	Vor 1918	87,24	1	60	60	76,47	60	7,98	0,001	10,11	0	0,05	3
2	RH.C	1919-1948	102,5	1	50,35	66,14	50,35	81,2	13,55	0	7,93	0	0,05	3
3	RH.D	1949-1957	136	1	81,2	136,66	81,2	46,2	25,65	0	16,2	0	0,05	3
4	RH.E	1958-1968	106,7	1	46,2	42,42	46,2	60,85	8,13	0	5,39	0	0,05	3
5	RH.F	1969-1978	96,642	1	60,85	55,72	60,85	73	11,92	0	8,33	0	0,05	3
6	RH.G	1979-1983	98,43	1	97,63	56,1	56,1	73	11,92	0	8,33	0	0,05	3
7	RH.H	1984-1994	116	1	64,87	52,9	56,08	56,08	18,2	0	4,2	0	0,05	3
8	RH.I	1995-2001	135,3	1	77,4	45,2	51,9	142,7	19,9	13,2	3,2	0	0,05	3
9	RH.J	2002-2006	138,1	1	91,3	147,7	70,7	85,46	9,56	15,88	3,34	0	0,05	3
10	RH.K	2007-2030	138,1	1	91,3	142,7	70,7	85,46	9,56	15,88	3,34	0	0,05	3
11	EFH.A	Vor 1918	199	1	134,19	171,78	134,19	171,78	18,2	0	4,2	0	0,05	3
12	EFH.B	1900-1918	128,9	1	83,12	196,04	45,6	144,9	22	18,2	12,15	0	0,05	3
13	EFH.C	1919-1948	275	2	237,3	213,99	144,9	144,9	22	18,2	12,15	0	0,05	3
14	EFH.D	1949-1957	101	1	125,4	119,8	62	83,4	6,02	17,38	3,6	0	0,05	3
15	EFH.E	1958-1968	242	1	180,9	185,33	145	10,02	18,24	10,29	7,57	0	0,05	3
16	EFH.F	1969-1978	157,5	1	183,13	170,55	78,32	16,64	10	7,87	3,12	0	0,05	3
17	EFH.G	1979-1983	196	1	100,8	161,4	83,4	6,02	17,38	3,6	7,57	0	0,05	3
18	EFH.H	1984-1994	136,55	1	123,2	213,2	75,33	12,73	14,84	2,1	5	0	0,05	3
19	EFH.I	1995-2001	110,8	1	115,5	128,6	84,3076	20,26	7,87	3,12	17,31	0	0,05	3
20	EFH.J	2002-2006	133,2	1	85,91	190,86	79,82	17,31	17,31	17,31	17,31	0	0,05	3
21	EFH.K	2007-2030	133,2	1	85,91	190,86	79,82	17,31	17,31	17,31	17,31	0	0,05	3

ID	Kürzel	Baualtersklasse [a]	Beheizte Wohnfläche [m ²]	Anzahl Wohneinheiten Wohneinheiten	Bauteilfläche oberer Gebäudeabschluss [m ²]	Bauteilfläche Außenwände [m ²]	Bauteilfläche unterer Gebäudeabschluss [m ²]	Transparente Bauteilflächen Süd [m ²]	Transparente Bauteilflächen West/Ost [m ²]	Transparente Bauteilflächen Nord [m ²]
22	MFH_A	Vor 1918	615,901	5	284,1	629,13	124,76	36,57	50,92	19,48
23	MFH_B	1900-1918	284	4	102,8	148	102,8	0	52,79	1,29
24	MFH_C	1919-1948	350	2	158,5	325,54	127,4	27,5	19	18,5
25	MFH_D	1949-1957	574,8	9	355	464	355	378	91,16	3,78
26	MFH_E	1958-1968	2844,61	32	971,11	2041	971,11	243,24	44,49	219,75
27	MFH_F	1969-1978	426,01	8	216,7	338	216,7	0	81,3	0
28	MFH_G	1979-1983	594,5	9	248,25	449,13	248,25	3,35	32,67	3,35
29	MFH_H	1984-1994	707,4	10	249,4	776,8	249,4	84,2	22,8	5,4
30	MFH_I	1995-2001	759	12	283,7	697,8	283,7	77,5	45,4	39,9
31	MFH_J	2002-2006	1991	19	580	1700	619,5	108,6	155,8	42,7
32	MFH_K	2007-2030	1991	19	580	1700	619,5	108,6	155,8	42,7
33	MFH_NBL_D	1946-1960	1753	16	538,714	1160,16	538,714	150,3	0	169,6
34	MFH_NBL_E	1961-1969	2493	32	811,92	1482,48	811,92	6	535	6
35	GMH_B	Vor 1918	754	11	231,8	307,4	163,7	2,3	131,6	2,3
36	GMH_C	1919-1948	1349,11	15	384,2	1246	395,6	24,72	253,8	0
37	GMH_D	1949-1957	1457	20	353,5	1378	353,5	38,3	256,6	0
38	GMH_E	1958-1968	3534	48	479,58	3249,79	459,24	26,59	646,13	14,31
39	GMH_F	1969-1978	3020	48	540	2132	540	34	458	5,3
40	GMH_NBL_F	1970-1980	2825	24	598,34	1601,73	598,34	278	0	183
41	GMH_NBL_G	1981-1985	2825	24	598,34	1675,73	598,34	215	0	172
42	GMH_NBL_H	1986-1990	2825	24	598,34	1675,73	598,34	215	0	172
43	HH_E	1958-1968	10408	189	501,19	5579,16	485,36	610,1	987,6	349,49
44	HH_F	1969-1978	18012	254	1468,97	10093,9	1468,97	763,88	1520,44	296,2
45	HH_NBL_F	1970-1980	4796	40	598,3369	2994,09	598,3369	0	756	0
46	HH_NBL_G	1981-1985	7270	64	695,12	4223,74	695,12	398,64	794,49	277,93

Tabelle 133: Instanzen der Klasse *Außenwand* (Auszug der Merkmale; Datengrundlage: vgl. Tabelle 25); *: mit 19% Mehrwertsteuer

ID	Im Urzustand	Fremd-energetische Stammdaten	Qualitätsenergetische Stammdaten	Sanierungs-jahr von [a]	Sanierungs-jahr bis [a]	Samierungs-jahr an	Orientierung	U-Wert [W/(m ² K)]	Investition* (€/m ²)	Preis-stand [a]	Beschreibung	Anwendbarkeit Fachwerk	Anwendbarkeit Massivbau	Anwendbarkeit HH_NBL	Anwendbarkeit RH bis GMH
1	Nein	-	1	0	1967	-	-	1,9	-	-	-	ja	ja	ja	ja
2	Nein	-	2	1968	1977	DIN 4108	-	1,2	-	-	-	ja	ja	ja	ja
3	Nein	-	3	1978	1981	WSchV 78	-	1,2	-	-	-	ja	ja	ja	ja

ID	Im Urzustand	Fremdschlüsselenergiescheinstammdaten	Qualitätsstufe	Sanierungsjahr von [a]	Sanierungsjahr bis [a]	Orientierung an	U-Wert [W/(m ² K)]	Investition* [€/m ²]	Preisstand [a]	Beschreibung	Anwendbarkeit Fachwerk	Anwendbarkeit Massivbau	Anwendbarkeit HH_NBL	Anwendbarkeit RH bis GMH
4	Nein	-	4	1982	1994	WSchV82	1,2	-	-	-	Ja	Ja	Ja	Ja
5	Nein	-	5	1995	2001	WSchV 95	0,5	-	-	-	Ja	Ja	Ja	Ja
6	Nein	-	6	2002	2003	EnEV 02	0,5	-	-	-	Ja	Ja	Ja	Ja
7	Nein	-	7	2004	2006	EnEV 04	0,45	-	-	-	Ja	Ja	Ja	Ja
8	Nein	-	8	2007	2008	EnEV 07	0,45	60	2009	HH, HH_NBL	Nein	Ja	Ja	Nein
9	Nein	-	9	2007	2050	EnEV 09	0,24	70	2009	HH, HH_NBL	Nein	Ja	Ja	Nein
10	Nein	-	10	2007	2050	EnEV 09-30%	0,17	73	2009	HH, HH_NBL	Nein	Ja	Ja	Nein
11	Nein	-	11	2007	2050	EnEV 09-50%	0,12	76	2009	HH, HH_NBL	Nein	Ja	Ja	Nein
13	Nein	-	8	2007	2008	EnEV 07	0,45	58	2009	Sonstiger Massivbau	Nein	Ja	Nein	Ja
14	Nein	-	9	2007	2050	EnEV 09	0,24	69	2009	Sonstiger Massivbau	Nein	Ja	Nein	Ja
15	Nein	-	10	2007	2050	EnEV 09-30%	0,17	73	2009	Sonstiger Massivbau	Nein	Ja	Nein	Ja
16	Nein	-	11	2007	2050	EnEV 09-50%	0,12	76	2009	Sonstiger Massivbau	Nein	Ja	Nein	Ja
17	Nein	-	8	2007	2008	EnEV 07	0,45	58	2009	Fachwerk	Ja	Nein	Nein	Ja
18	Nein	-	9	2007	2050	EnEV 09	0,24	69	2009	Fachwerk	Ja	Nein	Nein	Ja
19	Nein	-	10	2007	2050	EnEV 09-30%	0,17	73	2009	Fachwerk	Ja	Nein	Nein	Ja
20	Nein	-	11	2007	2050	EnEV 09-50%	0,12	76	2009	Fachwerk	Ja	Nein	Nein	Ja
24	Ja	1	0	-	-	-	1,7	-	-	-	Nein	Nein	Nein	Nein
25	Ja	2	0	-	25	-	1,39	-	-	-	Nein	Nein	Nein	Nein
26	Ja	3	0	-	-	-	0,86	-	-	-	Nein	Nein	Nein	Nein
27	Ja	4	0	-	-	-	1,44	-	-	-	Nein	Nein	Nein	Nein
28	Ja	5	0	-	-	-	0,8	-	-	-	Nein	Nein	Nein	Nein
29	Ja	6	0	-	-	-	0,68	-	-	-	Nein	Nein	Nein	Nein
30	Ja	7	0	-	-	-	0,77	-	-	-	Nein	Nein	Nein	Nein
31	Ja	8	0	-	-	-	0,49	-	-	-	Nein	Nein	Nein	Nein
32	Ja	9	0	-	-	-	0,45	-	-	-	Nein	Nein	Nein	Nein
33	Ja	10	0	-	-	-	0,45	-	-	-	Nein	Nein	Nein	Nein
34	Ja	11	0	-	-	-	1,9	-	-	-	Nein	Nein	Nein	Nein
35	Ja	12	0	-	-	-	1,7	-	-	-	Nein	Nein	Nein	Nein
36	Ja	13	0	-	-	-	1,7	-	-	-	Nein	Nein	Nein	Nein
37	Ja	14	0	-	-	-	0,93	-	-	-	Nein	Nein	Nein	Nein
38	Ja	15	0	-	-	-	1,44	-	-	-	Nein	Nein	Nein	Nein

ID	Im Urzustand	Fremdschlüsselenergiedaten	Qualitätsstufe	Samenrangsjahr von [a]	Samenrangsjahr bis [a]	Orientierung an	U-Wert [W/(m ² K)]	Investition* [€/m ²]	Preisstand [a]	Beschreibung	Anwendbarkeit Fachwerk	Anwendbarkeit Massivbau	Anwendbarkeit HH und HH_NBL	Anwendbarkeit RH bis GMH
39	Ja	16	0	-	-	-	1,21	-	-	-	Nein	Nein	Nein	Nein
40	Ja	17	0	-	-	-	0,8	-	-	-	Nein	Nein	Nein	Nein
41	Ja	18	0	-	-	-	0,68	-	-	-	Nein	Nein	Nein	Nein
42	Ja	19	0	-	-	-	0,5	-	-	-	Nein	Nein	Nein	Nein
43	Ja	20	0	-	-	-	0,35	-	-	-	Nein	Nein	Nein	Nein
44	Ja	21	0	-	-	-	0,35	-	-	-	Nein	Nein	Nein	Nein
45	Ja	22	0	-	-	-	1,9	-	-	-	Nein	Nein	Nein	Nein
46	Ja	23	0	-	-	-	1,45	-	-	-	Nein	Nein	Nein	Nein
47	Ja	24	0	-	-	-	1,64	-	-	-	Nein	Nein	Nein	Nein
48	Ja	25	0	-	-	-	1,44	-	-	-	Nein	Nein	Nein	Nein
49	Ja	26	0	-	-	-	1,21	-	-	-	Nein	Nein	Nein	Nein
50	Ja	27	0	-	-	-	0,74	-	-	-	Nein	Nein	Nein	Nein
51	Ja	28	0	-	-	-	0,8	-	-	-	Nein	Nein	Nein	Nein
52	Ja	29	0	-	-	-	0,66	-	-	-	Nein	Nein	Nein	Nein
53	Ja	30	0	-	-	-	0,28	-	-	-	Nein	Nein	Nein	Nein
54	Ja	31	0	-	-	-	0,28	-	-	-	Nein	Nein	Nein	Nein
55	Ja	32	0	-	-	-	0,28	-	-	-	Nein	Nein	Nein	Nein
56	Ja	33	0	-	-	-	1,21	-	-	-	Nein	Nein	Nein	Nein
57	Ja	34	0	-	-	-	1,46	-	-	-	Nein	Nein	Nein	Nein
58	Ja	35	0	-	-	-	1,45	-	-	-	Nein	Nein	Nein	Nein
59	Ja	36	0	-	-	-	1,45	-	-	-	Nein	Nein	Nein	Nein
60	Ja	37	0	-	-	-	1,21	-	-	-	Nein	Nein	Nein	Nein
61	Ja	38	0	-	-	-	1,3	-	-	-	Nein	Nein	Nein	Nein
62	Ja	39	0	-	-	-	1,46	-	-	-	Nein	Nein	Nein	Nein
63	Ja	40	0	-	-	-	0,88	-	-	-	Nein	Nein	Nein	Nein
64	Ja	41	0	-	-	-	0,88	-	-	-	Nein	Nein	Nein	Nein
65	Ja	42	0	-	-	-	0,76	-	-	-	Nein	Nein	Nein	Nein
66	Ja	43	0	-	-	-	1,11	-	-	-	Nein	Nein	Nein	Nein
67	Ja	44	0	-	-	-	0,82	-	-	-	Nein	Nein	Nein	Nein
68	Ja	45	0	-	-	-	0,99	-	-	-	Nein	Nein	Nein	Nein
69	Ja	46	0	-	-	-	0,99	-	-	-	Nein	Nein	Nein	Nein

Tabelle 134: Instanzen der Klasse *Energieträgerverfügbarkeit* (Auszug der Merkmale; Datengrundlage: vgl. Tabelle 33); *: Preisstand 2006 mit 19% Mehrwertsteuer

Beschreibung	Anwendbarkeit in EFH	Anwendbarkeit in MFH	Anwendbarkeit in GMH und HH	Referenzfläche [m ²]	Investition* [€]	Lebensdauer [a]	In Investition enthalten	Demontage- und Entsorgungsausgaben* [€]	In Demontage- und Entsorgungsausgaben enthalten	Modernisierungsanteil [€/€]
Heizöltank und Kelleraufstellung	Ja	Nein	Nein	150	3396	40	Heizöltank und Kelleraufstellung	747	Demontage des alten Tanks	0
Erdgasanschluss	Ja	Nein	Nein	150	1785	80	Erdgasanschluss	0	-	0
Sacksilo und Fördereinrichtung (auch bei Wechsel von Holz dezentral)	Ja	Nein	Nein	150	6432	40	Sacksilo und Fördereinrichtung	0	-	1
Schornstein	Ja	Nein	Nein	150	2380	80	Schornstein	0	-	0
Flüssiggastank	Ja	Nein	Nein	150	1785	80	-	-	-	0
Fernwärmeanschluss	Ja	Nein	Nein	150	-	-	-	-	-	0
Heizöltank und Kelleraufstellung	Nein	Ja	Nein	1000	5222	40	Heizöltank und Kelleraufstellung	747	Demontage des alten Tanks	0
Erdgasanschluss	Nein	Ja	Nein	1000	1785	80	Erdgasanschluss	0	-	0
Sacksilo und Fördereinrichtung (auch bei Wechsel von Holz dezentral)	Nein	Ja	Nein	1000	3344	40	Sacksilo und Fördereinrichtung	0	-	1
Schornstein	Nein	Ja	Nein	1000	3570	80	Schornstein	0	-	0
Flüssiggastank	Nein	Ja	Nein	1000	1785	80	-	-	-	0
Fernwärmeanschluss	Nein	Ja	Nein	1000	-	-	-	-	-	0
Heizöltank und Kelleraufstellung	Nein	Nein	Ja	5000	7735	40	Heizöltank und Kelleraufstellung	747	Demontage des alten Tanks	0
Erdgasanschluss	Nein	Nein	Ja	5000	1785	80	Erdgasanschluss	0	-	0
Sacksilo und Fördereinrichtung (auch bei Wechsel von Holz dezentral)	Nein	Nein	Ja	5000	3344	40	Sacksilo und Fördereinrichtung	0	-	1
Schornstein	Nein	Nein	Ja	5000	4760	80	Schornstein	0	-	0
Flüssiggastank	Nein	Nein	Ja	5000	1785	80	-	-	-	0
Fernwärmeanschluss	Nein	Nein	Ja	5000	-	-	-	-	-	0
Festbrennstofflager (ausschl. Pellets)	Ja	Nein	Nein	150	-	-	-	-	-	0
Festbrennstofflager (ausschl. Pellets)	Nein	Ja	Nein	1000	-	-	-	-	-	0
Festbrennstofflager (ausschl. Pellets)	Nein	Nein	Ja	5000	-	-	-	-	-	0
Elektrizitätsanschluss	Ja	Nein	Nein	150	-	-	-	-	-	0
Elektrizitätsanschluss	Nein	Ja	Nein	1000	-	-	-	-	-	0
Elektrizitätsanschluss	Nein	Nein	Ja	5000	-	-	-	-	-	0

A.2 Plausibilisierung der Startbestandserstellung

Tabelle 135: Abweichung der Wohnflächen und Wohneinheitenanzahl (inkl. Leerstand) im Jahr 2006 gemäß *AWOHM* von den vom IWU im Jahr 2007 veröffentlichten Werten differenziert nach Gebäudetyp (ohne Sonderbauten) und Baualtersklasse (eigene Berechnung; Datengrundlage für Vergleichswerte: IWU 2007)

Kennwert	Gebäudetyp	-1918 (Fachwerk)	-1918 (Massivbau)	1919-1948	1949-1957	1958-1968	1969-1978	1979-1983	1984-1994	1995-2001	2002-2006	Alle
Wohnfläche	EFH	25%	15%	34%	25%	11%	-6%	-1%	-12%	-38%	-23%	0%
	RH	-	11%	41%	19%	7%	5%	20%	-2%	-5%	-20%	9%
	MFH	3%	23%	18%	17%	4%	17%	-6%	16%	-39%	22%	6%
	GMH	-	29%	5%	19%	12%	-1%	-	-	-	-	13%
	HH	-	-	-	-	21%	7%	-	-	-	-	14%
Wohneinheitenanzahl	EFH	24%	-15%	11%	3%	4%	3%	-4%	-20%	-38%	-12%	-6%
	RH	-	-3%	19%	-11%	-12%	0%	8%	-18%	-20%	-21%	-5%
	MFH	-7%	16%	16%	3%	1%	23%	-8%	8%	-44%	23%	1%
	GMH	-	24%	0%	-1%	-1%	-4%	-	-	-	-	2%
	HH	-	-	-	-	27%	16%	-	-	-	-	22%

Tabelle 136: Abweichung der Wohnflächen und Wohneinheitenanzahl (inkl. Leerstand) im Jahr 2006 gemäß *AWOHM* von den vom IWU im Jahr 2007 veröffentlichten Werten differenziert nach Gebäudetyp (nur Sonderbauten) und Baualtersklasse (eigene Berechnung; Datengrundlage für Vergleichswerte: IWU 2007)

Kennwert	Gebäudetyp	1946-1960	1961-1969	1970-1980	1981-1985	1986-1990	Alle
Wohnfläche	MFH_NBL	324%	48%	-	-	-	150%
	GMH_NBL	-	-	65%	-11%	27%	29%
	HH_NBL	-	-	-35%	28%	-	-22%
Wohneinheitenanzahl	MFH_NBL	210%	51%	-	-	-	122%
	GMH_NBL	-	-	66%	-12%	27%	29%
	HH_NBL	-	-	-37%	50%	-	-22%

A.3 Ergänzung zur Identifizierung „sozialer Brennpunkte“

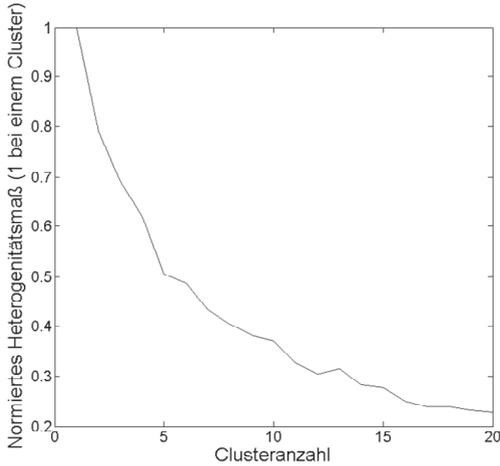


Abbildung 53: Normiertes Heterogenitätsmaß (Summe der Fehlerquadratsummen innerhalb von Clustern) in Abhängigkeit von der Clusteranzahl bei der Identifizierung „sozialer Brennpunkte“ für Selbstnutzer im Szenario *Staatsicht 11 MA*

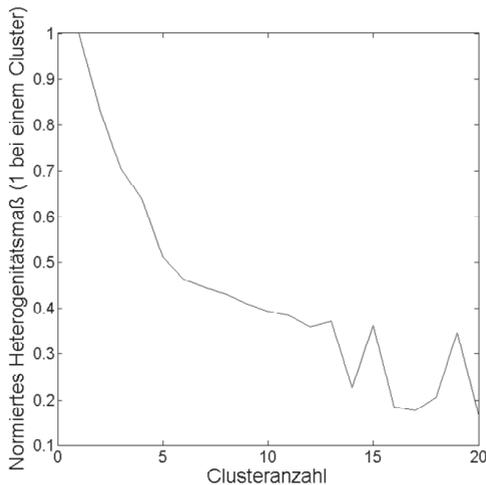


Abbildung 54: Normiertes Heterogenitätsmaß (Summe der Fehlerquadratsummen innerhalb von Clustern) in Abhängigkeit von der Clusteranzahl bei der Identifizierung „sozialer Brennpunkte“ für Mieter im Szenario *Staatsicht 11 MA*

B Literaturverzeichnis

- [1] 1. BImSchV, 2010. *Erste Verordnung zur Durchführung des Bundes-Immissionsschutzgesetzes (Verordnung über kleine und mittlere Feuerungsanlagen - 1. BImSchV)*.
- [2] Achtnicht, M., 2011. Do environmental benefits matter? Evidence from a choice experiment among house owners in Germany. *Ecological Economics*, 70(11), S. 2191–2200.
- [3] AGFW, 2010. *Fernwärme-Preisübersicht*, Frankfurt am Main: Arbeitsgemeinschaft Fernwärme.
URL: http://www.fernwaerme-info.com/fileadmin/Redakteure/dokumente/2010_Preisuebersicht_Versand_Internet.pdf
[Zugegriffen: 1. Oktober 2013].
- [4] Albrecht, T., J. Deffner, E. Dunkelberg, V. van der Land, I. Stieß, T. Vogelwohl, J. Weiß & S. Zundel, 2010. *Zum Sanieren Motivieren – Eigenheimbesitzer zielgerichtet für eine energetische Sanierung gewinnen*, Senftenberg: Projektverbund ENEF-Haus.
URL: <http://www.enef-haus.de> [Zugegriffen: 28. Februar 2014].
- [5] Albrecht, T. & S. Zundel, 2010. *Gefühlte Wirtschaftlichkeit – Wie Eigenheimbesitzer energetische Sanierungsmaßnahmen ökonomisch beurteilen*, Senftenberg: Hochschule Lausitz (HL).
URL: <http://www.enef-haus.de> [Zugegriffen: 28. Februar 2014].
- [6] Amelung, A., O. Arentz, J. Jänsch & L. Münstermann, 2012. *Auswirkungen staatlicher Eingriffe zur Förderung der Gebäudesanierung auf die Akteure des Immobilienmarkts*, Köln: Otto-Wolff-Institut für Wirtschaftsforschung.
URL: http://www.otto-woelf-institut.de/Publikationen/DiskussionPapers/OWIWO_DP_03_2012.pdf [Zugegriffen: 28. Februar 2014].
- [7] Amstalden, R.W., M. Kost, C. Nathani & D.M. Imboden, 2007. Economic potential of energy-efficient retrofitting in the Swiss residential building sector: The effects of policy instruments and energy price expectations. *Energy Policy*, 35(3), S. 1819–1829.

- [8] Arbeitsgemeinschaft Energiebilanzen e.V., 2012. *Auswertungstabellen zur Energiebilanz für die Bundesrepublik Deutschland 1990 bis 2011*.
URL: <http://www.ag-energiebilanzen.de>
[Zugegriffen: 1. Januar 2013].
- [9] Aydinalp, M., V. Ugursal & A. Fung, 2002. Modeling of the appliance, lighting, and space-cooling energy consumptions in the residential sector using neural networks. *Applied Energy*, 71(2), S. 87–110.
- [10] Aydinalp, M., V. Ugursal & A. Fung, 2004. Modeling of the space and domestic hot-water heating energy-consumption in the residential sector using neural networks. *Applied Energy*, 79(2), S. 159–178.
- [11] Aydinalp-Koksal, M. & V. Ugursal, 2008. Comparison of neural network, conditional demand analysis, and engineering approaches for modeling end-use energy consumption in the residential sector. *Applied Energy*, 85(4), S. 271–295.
- [12] Backhaus, K., B. Erichson, W. Plinke & R. Weiber, 2003. *Multivariate Analysemethoden – eine anwendungsorientierte Einführung*, 10. Auflage, Berlin: Springer.
- [13] BAFA, 2012a. *Biomasse - Basis-, Bonus- und Innovationsförderung*. URL: <http://www.bafa.de> [Zugegriffen: 3. Juli 2013].
- [14] BAFA, 2012b. *Solar - Basis-, Bonus- und Innovationsförderung*. URL: <http://www.bafa.de> [Zugegriffen: 3. Juli 2013].
- [15] BAFA, 2012c. *Wärmepumpe - Basis- und Bonusförderung*. URL: <http://www.bafa.de> [Zugegriffen: 3. Juli 2013].
- [16] Banfi, S., M. Farsi, M. Filippini & M. Jakob, 2008. Willingness to pay for energy-saving measures in residential buildings. *Energy Economics*, 30(2), S. 503–516.
- [17] Banfi, S., M. Farsi & M. Jakob, 2012. *An Analysis of Investment Decisions for Energy-Efficient Renovation of Multi-Family Buildings*,

- Bern: Bundesamt für Energie (BFE).
URL: <http://www.bfe.admin.ch/php/modules/enet/streamfile.php?file=000000010943.pdf&name=000000290710>
[Zugegriffen: 28. Februar 2014].
- [18] Bayerisches Landesamt für Umwelt, 2000. *Emissionskataster 2000*, Augsburg.
URL: <http://www.lfu.bayern.de/luft/emissionskataster/index.htm>
[Zugegriffen: 10. Dezember 2013].
- [19] BBSR, 2006. *CD-ROM Raumordnungsprognose 2020/2050*, Bonn: Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung.
- [20] Behnke, A., 2011. *Abatement measures for Small Combustion Installations - German Legislation*. Vortrag bei WGSR 51 - Air Pollution-related Policies.
URL: http://www.unece.org/fileadmin/DAM/env/documents/2013/air/wgsr_51/3_small_combustion_installations_Germany.pdf
[Zugegriffen: 27. Februar 2014].
- [21] Belton, V. & T.J. Stewart, 2003. *Multiple Criteria Decision Analysis - An Integrated Approach*, Boston, Dordrecht, London: Kluwer Academic Publishers.
- [22] Bertsch, V., 2008. *Uncertainty handling in multi-attribute decision support for industrial risk management*, Dissertation: Universität Karlsruhe (TH). Karlsruhe: Universitätsverlag Karlsruhe.
URL: <http://digbib.ubka.uni-karlsruhe.de/volltexte/documents/136883> [Zugegriffen: 27. Februar 2014].
- [23] Bettgenhäuser, K., 2011. 40% CO₂ saving target in the German building stock up to 2020 – integrated assessment scenarios with the Built-Environment-Analysis-Model BEAM². In: *eceee 2011 Summer Study proceedings, Energy efficiency first: The foundation of a low-carbon society*. S. 1149-1155.
URL: <http://proceedings.eceee.org/visabstrakt.php?event=1&doc=5-169-11> [Zugegriffen: 27. Februar 2014].

- [24] BewG, 2013. *Bewertungsgesetz*.
- [25] BGB, 2013. *Bürgerliches Gesetzbuch*.
- [26] BImSchG, 2012. *Gesetz zum Schutz vor schädlichen Umwelteinwirkungen durch Luftverunreinigungen, Geräusche, Erschütterungen und ähnliche Vorgänge (Bundes-Immissionsschutzgesetz - BImSchG)*.
- [27] BKI, 2008. *BKI KOSTENplaner 11*, Stuttgart.
- [28] BKI, 2010. *BKI Baukosten 2010*, Stuttgart.
- [29] BMVBW, 2001. *Leitfaden Nachhaltiges Bauen*, Berlin: Bundesministerium für Verkehr, Bau und Wohnungswesen; Bundesamt für Bauwesen und Raumordnung.
URL: <http://www.nachhaltigesbauen.de/leitfaeden-und-arbeitshilfen/leitfaden-nachhaltiges-bauen-ausgabe-2001.html>
[Zugegriffen: 28. Februar 2014].
- [30] Booth, A.T., R. Choudhary & D.J. Spiegelhalter, 2012. Handling uncertainty in housing stock models. *Building and Environment*, 48(0), S. 35–47.
- [31] Breun, P., T. Comes, C. Doll, M. Fröhling, M. Hiete, R. Ilsen, M. Krail, T. Lützkendorf, F. Schultmann, J. Stengel & M. Unholzer, 2012. *National Integrated Assessment Modelling zur Bewertung umweltpolitischer Instrumente - Entwicklung des otello-Modellsystems und dessen Anwendung auf die Bundesrepublik Deutschland*, Karlsruhe: KIT Scientific Publishing.
URL: <http://digbib.ubka.uni-karlsruhe.de/volltexte/1000028216>
[Zugegriffen: 28. Februar 2014].
- [32] Bruckner, T. & T. Wittmann, 2009. *Agent-based Modeling of Urban Energy Supply Systems Facing Climate Protection Constraints*. Vortrag in Marseille.
URL: <http://siteresources.worldbank.org/INTURBANDEVELOPMENT/Resources/336387-1256566800920/bruckner.pdf>
[Zugegriffen: 28. Februar 2014].

- [33] Buchert, M., C. Deilmann, U. Fritsche, W. Jenseit, A. Lipkow, L. Rausch, G. Schiller & S. Siedentop, 2003. *Nachhaltiges Bauen und Wohnen in Deutschland - Stoffflussbezogene Bausteine für ein nationales Konzept der nachhaltigen Entwicklung - Verknüpfung des Bereichs Bauen und Wohnen mit dem komplementären Bereich „Öffentliche Infrastruktur“*, Berlin: Umweltbundesamt.
URL: <http://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/publikation/long/2600.pdf> [Zugegriffen: 28. Februar 2014].
- [34] Bundeskabinett, 2010. *Energiekonzept für eine umweltschonende, zuverlässige und bezahlbare Energieversorgung*.
URL: http://www.bundesregierung.de/ContentArchiv/DE/Archiv17/_Anlagen/2012/02/energiekonzept-final.pdf?_blob=publicationFile&v=5 [Zugegriffen: 28. Februar 2014].
- [35] Bundesrat, 2013. *Beschluss des Bundesrates - Zweite Verordnung zur Änderung der Energieeinsparverordnung - Drucksache 113/13*.
URL: http://www.bundesrat.de/SharedDocs/drucksachen/2013/0101-0200/113-13%28B%29.pdf?_blob=publicationFile&v=4
[Zugegriffen: 4. Februar 2014].
- [36] Bundesregierung, 2002. *Perspektiven für Deutschland - Unsere Strategie für eine nachhaltige Entwicklung*.
URL: <http://bfm.de/fileadmin/NBS/documents/Nachhaltigkeitsstrategie-langfassung.pdf> [Zugegriffen: 28. Februar 2014].
- [37] Bundesregierung, 2007. *Eckpunkte für ein integriertes Energie- und Klimaprogramm*.
URL: http://www.bmub.bund.de/fileadmin/bmu-import/files/pdfs/allgemein/application/pdf/klimapaket_aug2007.pdf
[Zugegriffen: 28. Februar 2014].
- [38] Bundestag – Parlamentarischer Beirat für Nachhaltige Entwicklung, 2013. *Fortschrittsbericht 2012 zur nationalen Nachhaltigkeitsstrategie - Unterrichtung des Parlamentarischen Beirats für nachhaltige Entwicklung*.
URL: <http://www.bundestag.de/bundestag/gremien/nachhaltigkeit/>

- berichte/fortschrittsbericht_2012.pdf
[Zugegriffen: 28. Februar 2014].
- [39] Bundesverband Wärmepumpe e.V., 2010. *Kompetenz für Nachhaltigkeit im Wärmemarkt*, Imagebroschüre, Berlin.
URL: <http://www.domovita-haustechnik.de/zusatz/energiegesetze/Bundesverband%20WaermePumpe.pdf>
[Zugegriffen: 28. Februar 2014].
- [40] CDU/CSU & FDP, 2011. *Entwurf eines Gesetzes zur steuerlichen Förderung von energetischen Sanierungen an Wohngebäuden*.
URL: <http://dip21.bundestag.de/dip21/btd/17/060/1706074.pdf>
[Zugegriffen: 28. Februar 2014].
- [41] Charlier, D. & A. Risch, 2012. Evaluation of the impact of environmental public policy measures on energy consumption and greenhouse gas emissions in the French residential sector. *Energy Policy*, 46(0), S. 170–184.
- [42] co2online gGmbH, 2010. *Heizatlas*, Berlin.
URL: <http://www.heizatlas.de> [Zugegriffen: 1. Oktober 2010].
- [43] Cook, V. u. a., 2008. *Politiksznarien für den Klimaschutz IV - Szenarien bis 2030*, Dessau-Roßlau: Umweltbundesamt.
URL: <http://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/publikation/long/3361.pdf> [Zugegriffen: 28. Februar 2014].
- [44] Corradini, R., M. Beer & T. Schmid, 2012. Energiemodell der Wohngebäude – Räumlich hoch aufgelöste Modellierung des Wohngebäudebestands in Deutschland. *BWK - Das Energie-Fachmagazin*, 1/2, S. 48–53.
- [45] Cypra, S., 2010. *Auswirkungen von Energieeffizienzertifikaten auf Investitionsentscheidungen im Wohnungsbau*, Dissertation: Universität Karlsruhe (TH). Karlsruhe: KIT Scientific Publishing.
URL: <http://www.ksp.kit.edu/download/1000012893>
[Zugegriffen: 28. Februar 2014].

- [46] Debreu, G., 1960. Topological methods in cardinal utility theory. In: *K.J. Arrow, S. Karlin & P. Suppes: Mathematical Methods in Social Sciences*. Stanford: Stanford University Press.
- [47] Deutscher Energieholz- und Pellet-Verband e.V., 2013. *Marktdaten*. URL: <http://www.depv.de/startseite/marktdaten> [Zugegriffen: 1. Oktober 2013].
- [48] Diefenbach, N., H. Cischinsky, M. Rodenfels & K.D. Clausnitzer, 2010. *Datenbasis Gebäudebestand - Datenerhebung zur energetischen Qualität und zu den Modernisierungstrends im deutschen Wohngebäudebestand*, Darmstadt: Institut Wohnen und Umwelt, Bremer Energie Institut. URL: http://datenbasis.iwu.de/dl/Endbericht_Datenbasis.pdf [Zugegriffen: 28. Februar 2014].
- [49] Diefenbach, N. & A. Enseling, 2007. *Potentiale zur Reduzierung der CO₂-Emissionen bei der Wärmeversorgung von Gebäuden in Hessen bis 2012*, Darmstadt: Hessisches Ministerium für Umwelt, ländlichen Raum und Verbraucherschutz. URL: http://www.iwu.de/fileadmin/user_upload/dateien/energie/klima_altbau/IWU_Gebaeude_Potentialstudie_Hessen.pdf [Zugegriffen: 28. Februar 2014].
- [50] Diefenbach, N., T. Loga, H. Cischinsky, K.D. Clausnitzer & A. Vilz, 2007. *Grundlagen für die Entwicklung von Klimaschutzmaßnahmen im Gebäudebestand - Grundlagen über die bautechnische Struktur und den Ist-Zustand des Gebäudebestandes in Deutschland*, Berlin: Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung; Bundesamt für Bauwesen und Raumordnung. URL: http://www.bbsr.bund.de/BBSR/DE/Veroeffentlichungen/BBSROnline/2007/DL_ON222007.pdf;jsessionid=28970D787E5E564A03F9D3F0966ED623.live2053?_blob=publicationFile&v=2 [Zugegriffen: 28. Februar 2014].
- [51] Difu, 2011. *Klimaschutz in Kommunen - Praxisleitfaden*, Berlin: Deutsches Institut für Urbanistik gGmbH.

- URL: <http://www.leitfaden.kommunaler-klimaschutz.de>
[Zugegriffen: 28. Februar 2014].
- [52] DIN 276, 1993. *Kosten im Hochbau*, Berlin.
- [53] DIN 4701-10, 2003. *Energetische Bewertung heiz- und raumlufttechnischer Anlagen - Teil 10: Heizung, Trinkwassererwärmung, Lüftung, Berlin*.
- [54] DIN EN 15603, 2008. *Energieeffizienz von Gebäuden - Gesamtenergiebedarf und Festlegung der Energiekennwerte*, Deutsche Fassung, Berlin.
- [55] Draper, D., J.S. Hodges, E.E. Leamer, C.N. Morris & D.B. Rubin, 1987. *A Research Agenda for Assessment and Propagation of Model Uncertainty*, Santa Monica: RAND Corporation.
URL: <http://www.rand.org/pubs/notes/N2683.html>
[Zugegriffen: 28. Februar 2014].
- [56] Dreyer, A., 1975. *Nutzwertanalyse als Entscheidungsmodell bei mehrfacher Zielsetzung: e. Unters. zu Grundlagen u. Durchführung d. Nutzwertanalyse*, Dissertation: Universität Hamburg, Hamburg.
- [57] Dunkelberg, E. & I. Stieß, 2011. *Energieberatung für Eigenheimbesitzer/innen - Wege zur Verbesserung von Bekanntheit und Transparenz durch Systematisierung, Qualitätssicherung und kommunale Vernetzung*, Berlin: Institut für ökologische Wirtschaftsforschung.
URL: <http://www.enef-haus.de> [Zugegriffen: 28. Februar 2014].
- [58] Ebel, W., W. Eicke, W. Feist, O. Hildebrandt, H.-P. Hilpert, J. Klien, W. Kröning, H. Schmidt, B. Siepe & U. Wullkopf, 1990. *Energiesparpotentiale im Gebäudebestand*, Wiesbaden: Institut Wohnen und Umwelt.
- [59] Ebel, W., W. Eicke-Hennig, W. Feist & H.-M. Groscurth, 1995. *Einsparungen beim Heizwärmebedarf - ein Schlüssel zum Klimaproblem*, Darmstadt: Institut Wohnen und Umwelt.

- [60] Ebel, W., W. Eicke-Hennig, W. Feist & H.-M. Groscurth, 1996. *Der zukünftige Heizwärmebedarf der Haushalte*, Darmstadt: Institut Wohnen und Umwelt.
- [61] EEWärmeG, 2008. *Gesetz zur Förderung Erneuerbarer Energien im Wärmebereich (Erneuerbare-Energien-Wärmegesetz - EEWärmeG)*.
- [62] Eicke-Hennig, W., R. Born, W. Ebel, W. Feist, E. Hinz, M. Jäkel, T. Loga, H. Schmidt, Storch, O. Hildebrandt & B. Siepe, 1994. *Empirische Überprüfung der Möglichkeiten und Kosten, im Gebäudebestand und bei Neubauten Energie einzusparen und die Energieeffizienz zu steigern (ABL und NBL)*, Darmstadt: Institut Wohnen und Umwelt.
URL: http://www.energiesparaktion.de/downloads/Kacheln/Wirtschaftlichkeit/Empirische_Ueberpruefung_der_Moeglichkeiten_und_Kosten_im_Gebaeudebestand_100.pdf [Zugegriffen: 28. Februar 2014].
- [63] Elias, A.A., 2008. Energy efficiency in New Zealand's residential sector: A systemic analysis. *Energy Policy*, 36(9), S. 3278–3285.
- [64] EnEG, 2009. *Gesetz zur Einsparung von Energie in Gebäuden (Energieeinsparungsgesetz - EnEG)*.
- [65] EnergieStG, 2012. *Energiesteuergesetz (EnergieStG)*.
- [66] EnergieStV, 2012. *Verordnung zur Durchführung des Energiesteuergesetzes (Energiesteuer-Durchführungsverordnung)*.
- [67] EnEV, 2009. *Verordnung zur Änderung der Energieeinsparverordnung*.
- [68] EnEV - Kabinettsbeschluss der Bundesregierung, 2013. *Energieeinsparverordnung*.
- [69] EStG, 2010. *Einkommensteuergesetz*.
- [70] Ettema, D., 2011. A multi-agent model of urban processes: Modelling relocation processes and price setting in housing markets. *Computers, Environment and Urban Systems*, 35(1), S. 1–11.

- [71] Europäische Kommission, 2012. *Delegierte Verordnung (EU) Nr. 244/2012*.
URL: <http://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=OJ:L:2012:081:0018:0036:EN:PDF> [Zugegriffen: 2. April 2014].
- [72] Europäischer Rat, 2000. *Schlussfolgerungen des Vorsitzes*, Lissabon.
URL: <http://www.bologna-berlin2003.de/pdf/BeschluesseDe.pdf>
[Zugegriffen: 28. Februar 2014].
- [73] Europäischer Rat, 2010. *EUCO 13/10 - Übermittlungsvermerk des Generalsekretariats des Rates für die Delegationen*, Brüssel.
URL: <http://www.bmwi.de/BMWi/Redaktion/PDF/E/eu-rat-schlussfolgerungen-europa-2020-100617,property=pdf,bereich=bmwi2012,sprache=de,rwb=true.pdf> [Zugegriffen: 28. Februar 2014].
- [74] Europäisches Parlament, 2009. *DIRECTIVE 2009/125/EC OF THE EUROPEAN PARLIAMENT AND OF THE COUNCIL establishing a framework for the setting of ecodesign requirements for energy-related products (recast)*.
URL: <http://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=OJ:L:2009:285:0010:0035:en:PDF> [Zugegriffen: 14. April 2014].
- [75] Europäisches Parlament, 2010. *DIRECTIVE 2010/31/EU OF THE EUROPEAN PARLIAMENT AND OF THE COUNCIL on the energy performance of buildings (recast)*.
URL: <http://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=OJ:L:2010:153:0013:0035:EN:PDF> [Zugegriffen: 28. Februar 2014].
- [76] EUROSTAT, 2013. *RAMON Eurostat's Metadata Server*.
URL: <http://ec.europa.eu/eurostat/ramon>
[Zugegriffen: 28. Februar 2014].
- [77] EWärmeG, 2007. *Gesetz zur Nutzung erneuerbarer Wärmeenergie in Baden-Württemberg (Erneuerbare-Wärme-Gesetz - EWärmeG)*.
- [78] Fath, K. & J. Stengel, 2012. *CONCERTO Premium – Workpackage 1 – Target Group Profiles* (unveröffentlicht), Karlsruhe: Deutsch-Französisches Institut für Umweltforschung.

- [79] Finanzministerium Baden-Württemberg, 2010. *Bekanntmachung über die Kirchensteuerbeschlüsse im Land Baden-Württemberg für das Kalenderjahr 2010*.
URL: <http://www.steuer-forum-kirche.de/kistg-l-bawue.htm>
[Zugegriffen: 28. Februar 2014].
- [80] Firth, S.K., K.J. Lomas & A.J. Wright, 2010. Targeting household energy-efficiency measures using sensitivity analysis. *Building Research & Information*, 38(1), S. 25–41.
- [81] Forrester, J.W., 1961. *Industrial dynamics*, The M.I.T. Press.
- [82] Frondel, M., P. Grösche, N. Ritter, H. Tauchmann, C. Vance, P. Matuschek & U. Müller, 2011. *Erhebung des Energieverbrauchs der privaten Haushalte für die Jahre 2006-2008 - Teilbericht für das Projekt Erhebung des Energieverbrauchs der privaten Haushalte für die Jahre 2006-2010*, Berlin: Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie.
URL: <https://www.econstor.eu/dspace/bitstream/10419/72606/1/740364200.pdf> [Zugegriffen: 23. März 2014].
- [83] Frontier Economics Ltd., 2010. *Energiekosten in Deutschland - Entwicklungen, Ursachen und internationaler Vergleich (Projekt 43/09) - ENDBERICHT FÜR DAS BUNDESMINISTERIUM FÜR WIRTSCHAFT UND TECHNOLOGIE*, Berlin: Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie.
URL: <http://www.bmwi.de/Dateien/BMWi/Publikationen/Studien/energiekosten-deutschland-entwicklung-ursachen-internationaler-vergleich-langfassung.property=pdf,bereich=bmwi2012,sprache=de,rwb=true.pdf> [Zugegriffen: 28. Februar 2014].
- [84] Garner, T.I. & K. Short, 2009. Accounting for owner-occupied dwelling services: Aggregates and distributions. *Journal of Housing Economics*, 18(3), S. 233–248.
- [85] GdW, 2007. *Wohnungswirtschaftliche Daten und Trends 2006/2007*, Berlin: Bundesverband deutscher Wohnungs- und Immobilienunternehmen e.V.

- [86] Genoese, M., 2010. *Energiewirtschaftliche Analysen des deutschen Strommarkts mit agentenbasierter Simulation*, Dissertation: Karlsruher Institut für Technologie. Karlsruhe: Nomos Verlagsgesellschaft, Baden-Baden.
- [87] Geroski, P.A., 1999. Models of Technology Diffusion. *CEPR Discussion Papers*, 2146, S. 1–58.
- [88] Groesser, S. & S. Bruppacher, 2007. Decisions in the Construction Planning Process: Development of a Dynamic Model about Individual's Energy Efficiency Intention over Time. In: *Proceedings of the 25th International Conference of the System Dynamics Society*. Boston, S. 150–186.
URL: <https://www.alexandria.unisg.ch/publications/36102>
[Zugegriffen: 28. Februar 2014].
- [89] Groesser, S. & S. Ulli-Ber, 2007. The Structure and Dynamics of the Residential Built Environment: What Mechanisms Determine the Development of the Building Stock? In: *Proceedings of the 25th International Conference of the System Dynamics Society*. Boston, S. 100–115.
URL: <https://www.alexandria.unisg.ch/publications/34553>
[Zugegriffen: 28. Februar 2014].
- [90] Grösche, P., C. Schmidt & C. Vance, 2009. Identifying Free-Riding in Energy-Conservation Programs Using Revealed Preference Data. *Ruhr Economic Papers*, 99, S. 1–23.
- [91] Grösche, P. & C. Vance, 2009. Willingness to Pay for Energy Conservation and Free-Ridership on Subsidization: Evidence from Germany. *The Energy Journal*, 30(2), S. 135–153.
- [92] Großklos, M., E. Hinz & A. Enseling, 2001. *Vom Altbau zum Niedrigenergiehaus - Über die Machbarkeit ehrgeiziger Klimaschutzziele im Gebäudebestand von Wohnungsunternehmen*, Umweltstiftung WWF Deutschland, Institut Wohnen und Umwelt.
URL: http://www.iwu.de/fileadmin/user_upload/dateien/energie/klima_altbau/vomaltbauzumneh.pdf [Zugegriffen: 19. Januar 2014].

- [93] Hansen, P., 2009a. *Entwicklung eines energetischen Sanierungsmodells für den europäischen Wohngebäudesektor unter dem Aspekt der Erstellung von Szenarien für Energie und CO₂-Einsparpotenziale bis 2030*, Jülich: Forschungszentrum Jülich GmbH.
URL: <http://www.buchhandel.de/WebApi1/GetMmo.asp?MmoId=1078024&mmoType=PDF> [Zugegriffen: 28. Februar 2014].
- [94] Hansen, P., 2009b. *Haushaltssektor und Klimaschutz - Energie- und Emissionseinsparungen durch ein Strukturwandel-Szenario*, Jülich: Forschungszentrum Jülich GmbH.
URL: http://www.fz-juelich.de/SharedDocs/Downloads/IEK/IEK-ST E/DE/report_09_2009.pdf?_blob=publicationFile
[Zugegriffen: 28. Februar 2014].
- [95] Hansen, P., 2010. *Klimaschutz im Europäischen Gebäudesektor - Auf dem Weg zum Strukturwandel mit der neuen Gebäuderichtlinie?*, Jülich: Forschungszentrum Jülich GmbH.
URL: http://www.fz-juelich.de/SharedDocs/Downloads/IEK/IEK-ST E/EN/preprint_01_2010.pdf?_blob=publicationFile
[Zugegriffen: 28. Februar 2014].
- [96] Heeren, N., M. Gabathuler, H. Wallbaum, M. Jakob, G. Martius & N. Gross, 2009. *Gebäudeparkmodell - SIA Effizienzpfad - Energie Dienstleistungs- und Wohngebäude - Vorstudie zum Gebäudeparkmodell Schweiz - Grundlagen zur Überarbeitung des SIA Effizienzpfades Energie*, Bern: Bundesamt für Energie BFE.
URL: <http://www.bfe.admin.ch/php/modules/enet/streamfile.php?file=000000010241.pdf&name=000000290079>
[Zugegriffen: 28. Februar 2014].
- [97] Heinze GmbH, 2005. *Modernisierungsmarkt 2005*, Celle.
- [98] Henkel, J., 2011. *Modelling the Diffusion of Innovative Heating Systems in Germany - Decision Criteria, Influence of Policy and Vintage Path Dependencies*, Dissertation: Technische Universität Berlin. Berlin: Universitätsbibliothek der Technischen Universität Berlin.

- [99] Heuer, O.A., 2009. *Einfluss regionaler Faktoren auf den Wohnungsmietpreis - Veröffentlichung der an der Hochschule Darmstadt eingereichten Diplomarbeit*, Darmstadt: Institut Wohnen und Umwelt. URL: http://www.iwu.de/fileadmin/user_upload/dateien/wohnen/Diplomarbeit_Heuer.pdf [Zugegriffen: 1. April 2014].
- [100] Hiete, M., J. Stengel & F. Schultmann, 2011. Simulating energy demand and emissions of the residential building stock in Germany by taking occupant characteristics into account. In: *SB11 Helsinki World Sustainable Building Conference. Helsinki*, S. 1–9. URL: http://www.irbnet.de/daten/iconda/CIB_DC23014.pdf [Zugegriffen: 7. April 2014].
- [101] IINAS, 2013. *GEMIS - Globales Emissions-Modell integrierter Systeme*, Internationales Institut für Nachhaltigkeitsanalysen und -strategien. URL: <http://www.iinas.org> [Zugegriffen: 1. Oktober 2013].
- [102] Ilsen, R., 2012. *Ein Beitrag zur modellgestützten Analyse umweltpolitischer Instrumente in den Bereichen Luftreinhaltung und Klimawandel*, Dissertation: Karlsruher Institut für Technologie. Karlsruhe. URL: <http://www.ksp.kit.edu/download/1000025526> [Zugegriffen: 28. Februar 2014].
- [103] IWU, 2005. *Deutsche Gebäudetypologie, Systematik und Datensätze, Darmstadt*. URL: http://www.iwu.de/fileadmin/user_upload/dateien/energie/klima_altbau/Gebaeudetypologie_Deutschland.pdf [Zugegriffen: 3. März 2014].
- [104] IWU, 2007. *Deutsche Gebäudetypologie, Häufigkeiten von Gebäuden unterschiedlichen Baualters, Darmstadt*. URL: http://www.iwu.de/fileadmin/user_upload/dateien/energie/klima_altbau/Flaechen_Gebaeudetypologie_07.pdf [Zugegriffen: 3. März 2014].
- [105] Jäger, D., D. Schimpl-Neimanns & T. Siegel, 2009. *Mikrozensus Scientific Use File 2006 - Dokumentation und Datenaufbereitung*, Mann-

heim: GESIS - Leibniz-Institut für Sozialwissenschaften.

URL: http://www.gesis.org/fileadmin/upload/forschung/publikationen/gesis_reihen/gesis_methodenberichte/2009/gesis_mb_09_01.pdf [Zugegriffen: 3. März 2014].

- [106] Jahnke, K., 2009a. *Analyse der Mesoebene - Praxisakteure im Blickfeld nachhaltigen Wärmekonsums*, Bremen: Bremer Energie Institut. URL: http://www.uni-stuttgart.de/nachhaltigerkonsum/de/Downloads/AP2%20Analyse%20der%20Mesoebene_Endbericht2.pdf [Zugegriffen: 3. März 2014].
- [107] Jahnke, K., 2009b. *Gesetzliche Vorgaben und Förderinstrumente im Wärmeenergiebereich*, Bremen: Bremer Energie Institut. URL: <http://www.uni-stuttgart.de/nachhaltigerkonsum/de/Downloads/AP1%20Gesetzliche%20Vorgaben%20und%20Foerderinstrumente%20im%20Waermebereich.pdf> [Zugegriffen: 3. März 2014].
- [108] Jahnke, K. & T. Brüggemann, 2010. *Ergebnisse einer Befragung von Hauseigentümern*, Bremen: Bremer Energie Institut. URL: <http://www.uni-stuttgart.de/nachhaltigerkonsum/de/Downloads/AP3-Eigentuemerbefragung.pdf> [Zugegriffen: 3. März 2014].
- [109] Janssen, J. & W. Laatz, 2007. *Statistische Datenanalyse mit SPSS für Windows - Eine anwendungsorientierte Einführung in das Basissystem und das Modul Exakte Tests*. 6. Auflage, Berlin, Heidelberg, New York: Springer.
- [110] Johnston, D., 2003. *A PHYSICALLY-BASED ENERGY AND CARBON DIOXIDE EMISSION MODEL OF THE UK HOUSING STOCK*, Dissertation: Leeds Metropolitan University. Leeds. URL: <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.194.7917&rep=rep1&type=pdf> [Zugegriffen: 3. März 2014].
- [111] Kavgic, M., A. Mavrogianni, D. Mumovic, A. Summerfield, Z. Stevanovic & M. Djurovic-Petrovic, 2010. A review of bottom-up building stock models for energy consumption in the residential sector. *Building and Environment*, 45(7), S. 1683–1697.

- [112] Kesel, A., M. Junge & W. Nachtigall, 1999. *Einführung in die angewandte Statistik für Biowissenschaftler*, Basel, Boston, Berlin: Birkhäuser.
- [113] Kirchner, A. & F.C.M. Matthes, 2009. *Modell Deutschland – Klimaschutz bis 2050 – Vom Ziel her denken*, Basel, Berlin: WWF Deutschland.
URL: http://www.wwf.de/fileadmin/fm-wwf/Publikationen-PDF/WWF_Modell_Deutschland_Endbericht.pdf [Zugegriffen: 23. März 2014].
- [114] Kleemann, M. & P. Hansen, 2005. *Evaluierung der CO₂-Minderungsmaßnahmen im Gebäudebereich*, Bonn: Bundesamt für Bauwesen und Raumordnung. URL: <http://d-nb.info/1002183359/34> [Zugegriffen: 3. März 2014].
- [115] Kleemann, M., R. Heckler, G. Kolb & M. Hille, 2000. *Die Entwicklung des Wärmemarktes für den Gebäudesektor bis 2050*, Jülich: Forschungszentrum Jülich GmbH.
- [116] Klupp, M., J. Töpfer, T. Tribian, Wolfgang Neußer & M. Waltersbacher, 2010. *Investitionsprozesse im Wohnungsbestand der 70er und 80er Jahre*, Berlin: Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung.
URL: http://www.bbsr.bund.de/BBSR/DE/Veroeffentlichungen/BMVBS/WP/2010/heft68_DL.pdf;jsessionid=2CF2CC13A76D18CD87D7BD86E89BA07F.live1041?_blob=publicationFile&v=2 [Zugegriffen: 3. März 2014].
- [117] Knetsch, T., 2004. *Unsicherheiten in Ingenieurberechnungen*, Dissertation: Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg, Magdeburg.
URL: <http://diglib.uni-magdeburg.de/Dissertationen/2004/thoknetsch.pdf> [Zugegriffen: 3. März 2014].
- [118] Knissel, J., C. v. Malottki, R. Alles, M. Clar & Wolfgang Neußer, 2010. *Integration energetischer Differenzierungsmerkmale in Mietspiegel*, Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung im Bundesamt für Bauwesen und Raumordnung.

- URL: http://www.bbsr.bund.de/BBSR/DE/Veroeffentlichungen/BBSROnline/2010/DL_ON042010.pdf?_blob=publicationFile&v=2
[Zugegriffen: 3. März 2014].
- [119] Kost, M., 2006. *Langfristige Energieverbrauchs- und CO₂-Reduktionspotenziale im Wohngebäudesektor der Schweiz*, Dissertation: Eidgenössische Technische Hochschule Zürich. Zürich.
URL: http://www.up.ethz.ch/publications/documents/Kost_2006_Diss.pdf [Zugegriffen: 3. März 2014].
- [120] Kranzl, L. u. a., 2012. *Erarbeitung einer Integrierten Wärme- und Kältestrategie - Arbeitspaket 6 - Integrale Modellierung auf Basis vorhandener sektoraler Modelle und Erstellen eines integrierten Rechenmodells des Wärme- und Kältebereichs*, Wien, Karlsruhe, Bremen: Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit.
- [121] Kranzl, L., M. Hummel, A. Müller & J. Steinbach, 2013. Renewable heating: Perspectives and the impact of policy instruments. *Energy Policy*, 59(0), S. 44–58.
- [122] Kreditanstalt für Wiederaufbau, 2013a. *Merkmale Energieeffizient Sanieren – Investitionszuschuss*, Frankfurt am Main.
URL: <https://www.kfw.de> [Zugegriffen: 3. Juli 2013].
- [123] Kreditanstalt für Wiederaufbau, 2013b. *Merkmale Energieeffizient Sanieren – Kredit*, Frankfurt am Main.
URL: <https://www.kfw.de> [Zugegriffen: 3. Juli 2013].
- [124] Kretschmer, C., 2006. *Klimaschutz mit der KfW Förderbank*, Berlin: Kreditanstalt für Wiederaufbau, Niederlassung Berlin.
URL: <http://slideplayer.de/slide/646002/#>
[Zugegriffen: 3. März 2014].
- [125] Kröncke, T.-A., S. Schindler, P. Westerheide, S. Sebastian, T. Schnaidt, C. Pröhl & I. Ammann, 2011. *Finanzierungsstrategien wohnungswirtschaftlicher Akteure unter veränderten Rahmenbedingungen auf den Finanzierungsmärkten*, Berlin: Bundesministerium für Verkehr, Bau

- und Stadtentwicklung.
URL: http://www.bbsr.bund.de/BBSR/DE/Veroeffentlichungen/BM_VBS/Online/2011/DL_ON042011.pdf?_blob=publicationFile&v=2
[Zugegriffen: 3. März 2014].
- [126] Kwak, S.-Y., S.-H. Yoo & S.-J. Kwak, 2010. Valuing energy-saving measures in residential buildings: A choice experiment study. *Energy Policy*, 38(1), S. 673–677.
- [127] Land Hessen, 2013. *Entwurf eines Gesetzes zur steuerlichen Förderung von energetischen Sanierungsmaßnahmen an Wohngebäuden*. URL: http://www.bundesrat.de/cln_320/nn_1934482/SharedDocs/Drucksachen/2013/0401-500/448-13,templateId=raw,property=publicationFile.pdf/448-13.pdf [Zugegriffen: 3. März 2014].
- [128] Langniß, O., M. Schüller, H.-F. Wülbeck, M. Nast, M. Pehnt, S. Frick, H. Drück, E. Streicher, H. Hartmann & K. Reisinger, 2010. *Evaluierung von Einzelmaßnahmen zur Nutzung erneuerbarer Energien im Wärmemarkt (Marktanreizprogramm) für den Zeitraum 2009 bis 2011 – Evaluierung des Förderjahres 2009*, Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit.
URL: http://www.ifeu.de/energie/pdf/FICHT-6825484-v1-Evaluierung_MAP_09_final.pdf [Zugegriffen: 3. März 2014].
- [129] Launov, A., 2009. *Mikroökonomie – Skript zur Vorlesung*, Mainz: Johannes Gutenberg Universität Mainz. Fachbereich Wirtschaftswissenschaften.
URL: http://www.macro.economics.uni-mainz.de/Dateien/lecture_notes_final.pdf [Zugegriffen: 31. Januar 2014].
- [130] LDS NRW, 2008. *Analysen zur Einkommensarmut mit dem Mikrozensus*, Recklinghausen: Landesamt für Natur, Umwelt und Verbraucherschutz Nordrhein-Westfalen, Referat 331.
URL: http://www.mais.nrw.de/sozber/sozialberichterstattung_nrw/grundlagen/Armutsanalysen_mit_dem_Mikrozensus_-_041208.pdf
[Zugegriffen: 5. Dezember 2013].

- [131] Lee, T. & R. Yao, 2013. Incorporating technology buying behaviour into UK-based long term domestic stock energy models to provide improved policy analysis. *Energy Policy*, 52(0), S. 363–372.
- [132] Loga, T., 2012. *Kurzverfahren Energieprofil - Arbeitsblätter für die vereinfachte energetische Bewertung von Wohngebäuden*, Darmstadt: Institut Wohnen und Umwelt.
URL: http://www.iwu.de/fileadmin/user_upload/dateien/energie/werkzeuge/IWU_Energieprofil.zip [Zugegriffen: 14. Oktober 2013].
- [133] Loga, T. & U. Imkeller-Benjes, 1997. *Energiepass Heizung/Warmwasser - Energetische Qualität von Baukörper und Heizungssystem*, Darmstadt: Institut Wohnen und Umwelt.
URL: http://www.iwu.de/fileadmin/user_upload/dateien/energie/werkzeuge/ephw-1.pdf [Zugegriffen: 4. März 2014].
- [134] Lopes, M.A.R., C.H. Antunes & N. Martins, 2012. Energy behaviours as promoters of energy efficiency: A 21st century review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 16(6), S. 4095–4104.
- [135] Lowe, R., 2007. Technical options and strategies for decarbonizing UK housing. *Building Research & Information*, 35(4), S. 412–425.
- [136] Lünser, H., 2005. *Energieeinsparung im Hochbau - Bauprodukte für den Wärmeschutz*, Stuttgart: Innenministerium Baden-Württemberg.
- [137] Lützkendorf, T., 2012. *Energieeffizienz und Nachhaltigkeit in Baden-Württemberg - Stellenwert der Verbesserung der energetischen Qualität von Gebäuden für das Erreichen von Nachhaltigkeitszielen*. Vortrag in Stuttgart.
- [138] Lützkendorf, T., C.A. Graubner & G. Löhnert, 2008. *Fortsetzung des Dialogs Bauqualität - Erarbeitung von Lehrmodulen zum Nachhaltigen Bauen zur Unterstützung der Aus- und Weiterbildung der am Bau Beteiligten - Phase I: Analyse von Schlüsselakteuren und des Bedarfes an Lehrmodulen & Entwicklung von Handlungsanleitungen für Planer*, Berlin, Bonn: Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung; Bundesamt für Bauwesen und Raumordnung.

- URL: http://www.bbsr.bund.de/BBSR/DE/Veroeffentlichungen/BBSROnline/2008/DL_ON122008.pdf?_blob=publicationFile&v=2
[Zugegriffen: 27. März 2014].
- [139] Maalla, E.M.B. & P.L. Kunsch, 2008. Simulation of micro-CHP diffusion by means of System Dynamics. *Energy Policy*, 36(7), S. 2308–2319.
- [140] Mahajan, V., E. Muller & F.M. Bass, 1990. New Product Diffusion Models in Marketing: A Review and Directions for Research. *Journal of Marketing*, 54, S. 1–26.
- [141] Mahajan, V., E. Muller & F.M. Bass, 1993. Chapter 8 - New-product diffusion models. In: *J. Eliashberg & G.L. Lilien: Handbook in Operations Research and Management Science*. Amsterdam: North-Holland, S. 349–408.
- [142] Mahajan, V. & R.A. Peterson, 1985. *Models for Innovation Diffusion, Series: Quantitative Applications in The Social Sciences*, Newbury Park: Sage Publications.
- [143] Mahajan, V., E. Muller & Y. Wind, 2000. *New-Product Diffusion Models*, New York: Springer.
- [144] Maibach, M., N. Sieber, R. Bertenrath, D. Ewringmann, L. Koch, M. Thöne & P. Bickel, 2007. *Praktische Anwendung der Methodenkonvention: Möglichkeiten der Berücksichtigung externer Umweltkosten bei Wirtschaftlichkeitsrechnungen von öffentlichen Investitionen*, Zürich, Köln: Umweltbundesamt.
URL: <http://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/publikation/long/3194.pdf> [Zugegriffen: 4. März 2014].
- [145] Markewitz, G. & G. Stein, 2003. *Das IKARUS-Projekt: Energietechnische Perspektiven für Deutschland*, Jülich: Forschungszentrum Jülich GmbH.
URL: http://juwel.fz-juelich.de:8080/dspace/bitstream/2128/348/1/Umwelt_39.pdf [Zugegriffen: 4. März 2014].
- [146] MathWorks, 2011. *MATLAB*, Computerprogramm. Ismaning.

- [147] Matthes, F.C. u. a., 2009. *Politikszenerarien für den Umweltschutz V - auf dem Weg zum Strukturwandel - Treibhausgas-Emissionsszenarien bis zum Jahr 2030*, Dessau-Roßlau: Umweltbundesamt.
URL: <http://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/publikation/long/3764.pdf> [Zugegriffen: 4. März 2014].
- [148] Matthes, F.C. u. a., 2013. *Politikszenerarien für den Klimaschutz VI - Treibhausgas-Emissionsszenarien bis zum Jahr 2030*, Dessau-Roßlau: Umweltbundesamt.
URL: <http://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/461/publikationen/4412.pdf> [Zugegriffen: 4. März 2014].
- [149] McKenna, R., E. Merkel, D. Fehrenbach, S. Mehne & W. Fichtner, 2013. Energy efficiency in the German residential sector: A bottom-up building-stock-model-based analysis in the context of energy-political targets. *Building and Environment*, 62(0), S. 77-88.
- [150] Meade, N., 1984. The use of growth curves in forecasting market development - a review and appraisal. *Journal of Forecasting*, 3(4), S. 429-451.
- [151] Meade, N. & T. Islam, 2001. Forecasting the diffusion of innovations: implications for time-series extrapolation. In: *J.S. Armstrong: Principles of forecasting - a handbook for researchers and practitioners*. New York: Springer.
- [152] Meade, N. & T. Islam, 2006. Modelling and forecasting the diffusion of innovation - A 25-year review. *International Journal of Forecasting*, 22, S. 519-545.
- [153] Merz, M., 2011. *Entwicklung einer indikatorenbasierten Methodik zur Vulnerabilitätsanalyse für die Bewertung von Risiken in der industriellen Produktion*, Dissertation: Karlsruher Institut für Technologie. Karlsruhe: KIT Scientific Publishing.
URL: <http://digbib.ubka.uni-karlsruhe.de/volltexte/documents/1848300> [Zugegriffen: 4. März 2014].

- [154] Michaelis, P., 1996. *Ökonomische Instrumente in der Umweltpolitik. Eine anwendungsorientierte Einführung*, 1. Auflage, Heidelberg: Physica-Verlag.
- [155] Michelsen, C.C. & R. Madlener, 2012. Homeowners' preferences for adopting innovative residential heating systems: A discrete choice analysis for Germany. *Energy Economics*, 34(5), S. 1271–1283.
- [156] Mosena, R. & E. Winter, 2014. *Gabler Wirtschaftslexikon*, Wiesbaden: Springer Gabler.
URL: <http://wirtschaftslexikon.gabler.de/Archiv/12050/kohorte-v9.html> [Zugegriffen: 11. März 2014].
- [157] Möst, D. & W. Fichtner, 2009. Einführung in die Energiesystemanalyse. In: *D. Möst, W. Fichtner & A. Grunwald: Energiesystemanalyse*. Karlsruhe: Universitätsverlag Karlsruhe.
URL: http://www.google.de/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=2&cad=rja&ved=0CDMQFjAB&url=http%3A%2F%2Fwww.ip.kit.edu%2F447.php&ei=mtoVU80eDKfE7Aa_5IC4Dw&usg=AFQjCNG2ubfjLf990ebIYoXKLzmEZiNkAw&sig2=VS1vot6AIqf_uw0lBjNKKQ&bvm=bv.62286460,d.ZGU [Zugegriffen: 4. März 2014].
- [158] Müller, A. & P. Biermayr, 2011. Die Zukunft des Wärmebedarfs für Heizung und Brauchwassererwärmung in österreichischen Gebäuden bis 2050. Vortrag bei *7. Internationaler Energiewirtschaftstagung*.
URL: http://eeg.tuwien.ac.at/eeg.tuwien.ac.at_pages/events/iewt/iewt2011/uploads/presentation_iewt2011/Pr_30_Mueller_Andreas_16-Feb-2011,_10-21.pdf [Zugegriffen: 6. März 2014].
- [159] Müller, A., P. Biermayr, L. Kranzl, H. Reinhard, F. Althenburger, I. Bergmann, G. Friedl, W. Haslinger, R. Heimrath, R. Ohnmacht & W. Weiss, 2010. *Heizen 2050: Systeme zur Wärmebereitstellung und Raumklimatisierung im österreichischen Gebäudebestand: Technologische Anforderungen bis zum Jahr 2050*, Wien.
URL: <http://www.bioenergy2020.eu/files/publications/pdf/Heizen2050-Endbericht.pdf> [Zugegriffen: 6. März 2014].

- [160] Müller, M.O., 2012. *How can the Diffusion of Energy-Efficient Renovations of Buildings be Accelerated?*, Dissertation: University of St. Gallen. St. Gallen.
URL: [http://verdi.unisg.ch/www/edis.nsf/SysLkpByIdentifier/4030/\\$FILE/dis4030.pdf](http://verdi.unisg.ch/www/edis.nsf/SysLkpByIdentifier/4030/$FILE/dis4030.pdf) [Zugegriffen: 6. März 2014].
- [161] Müller, W., 2004. *Multivariate Statistik im Quantitativen Marketing – Konzeption und Anwendungsbereiche der Clusteranalyse*. Fachhochschule Dortmund, Institut für Angewandtes Markt-Management, *Reihe Forschungspapier*, 9, S. 1–59.
- [162] Mundaca, L., L. Neij, E. Worrell & M. McNeil, 2010. Evaluating Energy Efficiency Policies with Energy-Economy Models. *Annual Review Environment Resources*, 5, S. 305–344.
- [163] Nardo, M., M. Saisana, A. Saltelli, S. Tarantola, A. Hoffman & E. Giovannini, 2005. *Handbook on Constructing Composite Indicators: Methodology and User Guide*. *OECD Statistics Working Paper Series*, 3, S. 1–108.
- [164] Ott, W., M. Jakob, M. Baur, Y. Kaufmann & A. Ott, 2005. *Mobilisierung der energetischen Erneuerungspotenziale im Wohnbaubestand*, Bern, Grenchen: Bundesamt für Energie BFE, Bundesamt für Wohnungswesen BWO.
URL: http://www.cepe.ethz.ch/publications/Jakob_Mobilisierung_der_energetischen_Erneuerungspotenziale_im_Wohnbaubestand_d.pdf [Zugegriffen: 6. März 2014].
- [165] Payk, B., 2011. *Rückbau Süd-West? – Teil I: Erklärungsfaktoren der Bevölkerungsentwicklung*. Statistisches Landesamt Baden-Württemberg, Stuttgart, *Statistisches Monatsheft Baden-Württemberg*, 5, S. 11–16.
- [166] Pfaffenberger, W. u. a., 2001a. *Pluralistische Wärmeversorgung – AGFW-Hauptstudie – Erster Bearbeitungsschritt – Band 1 – Kurzfassung*, Bremen: Bremer Energie Institut.

- [167] Pfaffenberger, W. u. a., 2001b. *Pluralistische Wärmeversorgung - AGFW-Hauptstudie - Erster Bearbeitungsschritt - Band 1 - Langfassung*, Bremen: Bremer Energie Institut.
- [168] Pfaffenberger, W. u. a., 2001c. *Pluralistische Wärmeversorgung - AGFW-Hauptstudie - Erster Bearbeitungsschritt - Band 2*, Bremen: Bremer Energie Institut.
- [169] Pfaffenberger, W. u. a., 2004a. *Pluralistische Wärmeversorgung - AGFW-Hauptstudie - Zweiter Bearbeitungsschritt - Band 1*, Bremen: Bremer Energie Institut.
- [170] Pfaffenberger, W. u. a., 2004b. *Pluralistische Wärmeversorgung - AGFW-Hauptstudie - Zweiter Bearbeitungsschritt - Band 2*, Bremen: Bremer Energie Institut.
- [171] Pfaffenberger, W. u. a., 2004c. *Pluralistische Wärmeversorgung - AGFW-Hauptstudie - Zweiter Bearbeitungsschritt - Band 3*, Bremen: Bremer Energie Institut.
- [172] Pfeiffer, F., M. Struschka & G. Baumbach, 2000. *Ermittlung der mittleren Emissionsfaktoren zur Darstellung der Emissionsentwicklung aus Feuerungsanlagen im Bereich der Haushalte und Kleinverbraucher*, Berlin: Umweltbundesamt.
- [173] Pistohl, W., 2000. *Handbuch der Gebäudetechnik*, 3. Auflage, Düsseldorf: Werner Verlag.
- [174] Rentz, O., M. Ruch, F. Schultmann, V. Sindt, T. Zundel, C. Charlot-Valdieu & E. Vimond, 1998. *Selektiver Gebäuderückbau und konventioneller Abbruch - Technisch-wirtschaftliche Analyse eines Pilotprojektes*, Landsberg: Ecomed.
- [175] Rentz, O., F. Schultmann, M. Ruch & V. Sindt, 1997. *Demontage und Recycling von Gebäuden - Entwicklung von Demontage- und Verwertungskonzepten unter besonderer Berücksichtigung der Umweltverträglichkeit*, Landsberg: Ecomed.

- [176] Ronning, G., 2005. *Statistische Methoden in der empirischen Wirtschaftsforschung*, 1. Auflage, Münster: LIT.
- [177] Sachverständigenrat für Umweltfragen, 1994. *Umweltgutachten 1994 des Rates von Sachverständigen für Umweltfragen für eine dauerhaft-umweltgerechte Entwicklung*, Wiesbaden.
URL: <http://dip21.bundestag.de/dip21/btd/12/069/1206995.pdf>
[Zugegriffen: 23. März 2014].
- [178] Sadler, M., 2003. *Home energy preferences and policy: Applying stated choice modeling to a hybrid energy economy model*, Vancouver: Simon Fraser University.
URL: <http://www2.cieedac.sfu.ca/media/publications/Rpt%20to%20NRCan%20Margo%20Sadler.pdf> [Zugegriffen: 6. März 2014].
- [179] Sartori, I., H. Bergsdal, D. Müller & H. Bratterbo, 2008. Towards modelling of construction, renovation and demolition activities: Norway's dwelling stock, 1900-2100. *Building Research & Information*, 36(5), S. 412-425.
- [180] Schätzl, L., H. Oertel, J. Banse, W. Killische, S. Jentsch, J. Glatter, K. Kaufmann & W. Neußer, 2007. *Investitionsprozesse im Wohnungsbestand – unter besonderer Berücksichtigung privater Vermieter*, Berlin, Bonn: Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung; Bundesamt für Bauwesen und Raumordnung.
URL: <http://www.bbsr.bund.de/BBSR/DE/Veroeffentlichungen/BMVBS/Forschungen/2007/Heft129.html?nn=395966>
[Zugegriffen: 23. März 2014].
- [181] Schultmann, F., 1998. *Kreislaufführung von Baustoffen - Stoffflussbasiertes Projektmanagement für die operative Demontage- und Recyclingplanung von Gebäuden*, Dissertation: Universität Karlsruhe (TH). Karlsruhe: Schmidt, Berlin.
- [182] Schwermer, S., 2007. *Ökonomische Bewertung von Umweltschäden - Methodenkonvention zur Schätzung externer Umweltkosten*, Dessau: Umweltbundesamt.

- URL: http://www.dflid.de/Downloads/UBA_070427_ExterneKosten-2.pdf [Zugegriffen: 23. März 2014].
- [183] Seitz, K., K. Fath, R. McKenna, J. Stengel, W. Fichtner & F. Schultmann, 2013. Information needs for community-level energy investments: some insights from a CONCERTO questionnaire. In: *eceee Summer Study proceedings, Rethink, renew, restart*. S. 845–854.
URL: <http://proceedings.eceee.org/visabstrakt.php?event=3&doc=3-282-13> [Zugegriffen: 23. März 2014].
- [184] SGB, 2010. *Sozialgesetzbuch I bis XII*.
- [185] Siller, T., Michael Kost & D. Imboden, 2007. Long-term energy savings and greenhouse gas emission reductions in the Swiss residential sector. *Energy Policy*, 35(1), S. 529–539.
- [186] SolzG, 1995. *Solidaritätszuschlaggesetz*.
- [187] Sopha, B.M., 2011. *Agent-Based Modeling and Simulation of Clean Heating System Adoption in Norway*, Dissertation: Norwegian University of Science and Technology. Trondheim.
URL: <http://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:414639/FULLTEXT02> [Zugegriffen: 23. März 2014].
- [188] Sopha, B.M., C.A. Klöckner & E.G. Hertwich, 2011. Exploring policy options for a transition to sustainable heating system diffusion using an agent-based simulation. *Energy Policy*, 39(5), S. 2722–2729.
- [189] Spindler, E.A., o. J. *Geschichte der Nachhaltigkeit - Vom Werden und Wirken eines beliebten Begriffes*, Hamm.
URL: <http://www.nachhaltigkeit.info/media/1326279587phpeJPyvC.pdf> [Zugegriffen: 23. März 2014].
- [190] Staatliche Vermögens- und Hochbauverwaltung Baden-Württemberg, 2006. *Kosten technischer Gebäudeausrüstung*, Stuttgart: Finanzministerium Baden-Württemberg.

- [191] Statistische Ämter des Bundes und der Länder, 2010. *Mikrozensus 2010 - Muster - Stichprobenerhebung über die Bevölkerung und den Arbeitsmarkt und Arbeitskräftestichprobe 2010 der Europäischen Union*.
URL: <https://www.datenschutzzentrum.de/mikrozensus/mikrozensus-2010-fragebogen.pdf> [Zugegriffen: 27. Januar 2014].
- [192] Statistische Ämter des Bundes und der Länder, 2011. *Zensus 2011 - Musterfragebogen zur Gebäude- und Wohnungszählung*.
URL: https://www.zensus2011.de/SharedDocs/Downloads/DE/Fragebogen/Fragebogen_Gebaeude_und_Wohnungszaehlung.pdf?jsessionid=59823D357980B74CF576DFEB3E497667.2_cid353?__blob=publicationFile&v=7 [Zugegriffen: 23. März 2014].
- [193] Statistische Ämter des Bundes und der Länder, 2014. *Webseite zum Datenangebot in Bezug auf den Mikrozensus*.
URL: <http://www.forschungsdatenzentrum.de/bestand/mikrozensus> [Zugegriffen: 28. Januar 2014].
- [194] Statistisches Bundesamt, 2005. *Qualitätsbericht - Mikrozensus-Zusatzerhebung zur Wohnsituation*, Wiesbaden.
URL: https://www.destatis.de/DE/Publikationen/Qualitaetsberichte/Bevoelkerung/Zusatzerhebung.pdf?__blob=publicationFile [Zugegriffen: 23. März 2014].
- [195] Statistisches Bundesamt, 2006-2010. *Veröffentlichungen der Fachserie 5 mit den Bezugsjahren 2006-2010*, Wiesbaden.
- [196] Statistisches Bundesamt, 2008a. *Bautätigkeit und Wohnungen - Mikrozensus-Zusatzerhebung 2006 - Bestand und Struktur der Wohneinheiten sowie Wohnsituation der Haushalte - Fachserie 5 Heft 1*, Wiesbaden.
- [197] Statistisches Bundesamt, 2008b. *DVD Statistik lokal*, Wiesbaden.
- [198] Statistisches Bundesamt, 2008c. *Mikrozensus 2006 - Scientific-Use-File*, Wiesbaden.

- [199] Statistisches Bundesamt, 2010. *Nachhaltige Entwicklung in Deutschland - Indikatorenbericht 2010*, Wiesbaden.
URL: <https://www.destatis.de/DE/Publikationen/Thematisch/Umwelt/okonomischeGesamtrechnungen/Indikatorenbericht2010.html>
[Zugegriffen: 23. März 2014].
- [200] Statistisches Bundesamt, 2011. *Ausgewählte Zahlen für die Bauwirtschaft*, Wiesbaden.
- [201] Statistisches Bundesamt, 2012a. *Bevölkerung und Erwerbstätigkeit - Bevölkerungsfortschreibung 2010 - Fachserie 1 Reihe 1.3*, Wiesbaden.
- [202] Statistisches Bundesamt, 2012b. *Bevölkerung und Erwerbstätigkeit - Haushalte und Familien - Ergebnisse des Mikrozensus 2011 - Fachserie 1 Reihe 3*, Wiesbaden.
- [203] Statistisches Bundesamt, 2012c. *Bevölkerung und Erwerbstätigkeit - Natürliche Bevölkerungsbewegung 2010 - Fachserie 1 Reihe 1.1*, Wiesbaden.
- [204] Statistisches Bundesamt, 2012d. *Bevölkerung und Erwerbstätigkeit - Statistik der rechtskräftigen Beschlüsse in Eheauf Lösungssachen (Scheidungsstatistik) 2011 - Fachserie 1 Reihe 1.4*, Wiesbaden.
- [205] Statistisches Bundesamt, 2012e. *Bevölkerung und Erwerbstätigkeit - Wanderungen 2010 - Fachserie 1 Reihe 1.2*, Wiesbaden.
- [206] Steinbach, J., 2013. Akteurspezifische Untersuchung von Strategien zur Steigerung der Energieeffizienz und zum Ausbau erneuerbarer Energien im Wohngebäudebereich. In: *8. Internationale Energiewirtschaftstagung*. Wien, S. 1-18.
- [207] Stengel, J., M. Unholzer, M. Hiete, T. Lützkendorf & F. Schultmann, 2012. Teil III. - Wohngebäude. In: *P. Breun, T. Comes, C. Doll, M. Fröhling, M. Hiete, R. Ilsen, M. Krail, T. Lützkendorf, F. Schultmann, J. Stengel & M. Unholzer: National Integrated Assessment Modelling zur Bewertung umweltpolitischer Instrumente - Entwicklung des otello-*

- Modellsystems und dessen Anwendung auf die Bundesrepublik Deutschland*. Karlsruhe: KIT Scientific Publishing, S. 225–345.
URL: <http://digbib.ubka.uni-karlsruhe.de/volltexte/1000028216>
[Zugegriffen: 28. Februar 2014]
- [208] Stieß, I., B. Birzle-Harder & J. Deffner, 2009. „*So ein Haus ist auch die Sparkasse von einem*“ - *Motive und Barrieren von Eigenheimbesitzerinnen und -besitzern gegenüber einer energieeffizienten Sanierung: Ergebnisse einer qualitativen Untersuchung*, Frankfurt am Main: Institut für sozial-ökologische Forschung.
URL: <http://www.enef-haus.de> [Zugegriffen: 24. März 2014].
- [209] Stieß, I., V. van der Land, B. Birzle-Harder & J. Deffner, 2010. *Handlungsmotive, -hemmnisse und Zielgruppen für eine energetische Gebäudesanierung - Die Ergebnisse einer standardisierten Befragung von Eigenheimsanierern*, Frankfurt am Main: Institut für sozial-ökologische Forschung.
URL: <http://www.enef-haus.de> [Zugegriffen: 24. März 2014].
- [210] Struschka, M., D. Kilgus, M. Springmann & G. Baumbach, 2008. *Effiziente Bereitstellung aktueller Emissionsdaten für die Luftreinhaltung*, Dessau-Roßlau: Umweltbundesamt.
URL: <http://www.umweltbundesamt.de/publikationen/effiziente-bereitstellung-aktueller-emissionsdaten> [Zugegriffen: 24. März 2014].
- [211] Struschka, M., U. Zuberbühler, A. Dreiseidler, D. Dreizler & G. Baumbach, 2003. *Ermittlung und Evaluierung der Feinstaubemissionen aus Kleinf Feuerungsanlagen im Bereich der Haushalte und Kleinverbraucher sowie Ableitung von geeigneten Maßnahmen zur Emissionsminderung*, Berlin: Umweltbundesamt.
URL: <http://www.umweltbundesamt.de/publikationen/ermittlung-evaluierung-feinstaubemissionen-aus> [Zugegriffen: 24. März 2014].
- [212] Stüber, C., 2009. *Entwicklung eines Berechnungstools zur ökonomischen Bewertung des EEWärmeG und der EnEV 2009*, Jülich: Forschungszentrum Jülich GmbH.
URL: <http://www.fz-juelich.de/SharedDocs/Downloads/IEK/IEK-ST>

- E/DE/Student%20Research%20Report%2002_2009.pdf?_blob=publicationFile [Zugegriffen: 24. März 2014].
- [213] Swan, L. & V. Ugursal, 2009. Modeling of end-use energy consumption in the residential sector: A review of modeling techniques. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 13(8), S. 1819–1835.
- [214] Testorf, L., M. Voigtländer & T. Zens, 2010. *Wohngebäudesanierer-Befragung 2010 – Hintergründe und Motive zur energetischen Sanierung des Wohngebäudebestands*, Frankfurt am Main: KfW Bankengruppe; Institut der deutschen Wirtschaft Köln e.V.
URL: <https://www.kfw.de/Download-Center/Konzerntemen/Research/PDF-Dokumente-Sonderpublikationen/Wohngeb%C3%A4udesanierer-Befragung-2010.pdf> [Zugegriffen: 1. Oktober 2013].
- [215] Theis, C. & W. Kernbichler, 2002. *Grundlagen der Monte Carlo Methoden*, Technische Universität Graz.
URL: <http://itp.tugraz.at/MML/MonteCarlo/MCIntro.pdf>
[Zugegriffen: 24. März 2014].
- [216] U.S. Energy Information Administration, 2010. *Model Documentation Report: Residential Sector Demand Module of the National Energy Modeling System*, Washington, DC: Office of Integrated Analysis and Forecasting, U.S. Energy Information Administration, U.S. Department of Energy.
- [217] Umweltbundesamt, 2012a. *CRF-Tabellen für die Bundesrepublik Deutschland*, Dessau-Roßlau.
URL: <http://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/419/dokumente/germany-2012-v1.2.zip>
[Zugegriffen: 24. März 2014].
- [218] Umweltbundesamt, 2012b. *Nationale Trendtabellen für die deutsche Berichterstattung atmosphärischer Emissionen*, Dessau-Roßlau.
URL: http://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/419/dokumente/2012_02_09_em_entwicklung_in_d_trendtabelle_luft_v1.1.0.xls bzw.
<http://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/419/>

- dokumente/2011_12_14_em_entwicklung_in_d_trendtabelle_thg_v1.2
.0.zip [Zugegriffen: 24. März 2014].
- [219] Umweltbundesamt, 2012c. *NFR-Tabellen für die Bundesrepublik Deutschland*, Dessau-Roßlau.
URL: http://cdr.eionet.europa.eu/de/un/UNECE_CLRTAP_DE/envtzjuzg [Zugegriffen: 24. März 2014].
- [220] UN, 1987. *Our Common Future*.
- [221] UN, 1992. *United Nations Framework Convention on Climate Change*.
- [222] UN, 1998. *Kyoto Protocol to the United Nations Framework Convention on Climate Change*, Kyoto.
- [223] UN, 2012. *Doha amendment to the Kyoto Protocol*, Doha.
- [224] UNECE, 1979. *Convention on Long-range Transboundary Air Pollution*.
- [225] UNECE, 2012. *Amendment of the text of and annexes II to IX to the 1999 Protocol to Abate Acidification, Eutrophication and Ground-level Ozone and the addition of new annexes X and XI*.
- [226] Usha Rao, K. & V.V.N. Kishore, 2010. A review of technology diffusion models with special reference to renewable energy technologies. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 14(3), S. 1070–1078.
- [227] Van der Land, V., 2010. *Die Rolle von Geschlecht im Sanierungsprozess - Ergebnisse einer qualitativen Befragung von Eigenheimsaniererinnen und Eigenheimsanierern*, Frankfurt am Main: Institut für sozial-ökologische Forschung.
URL: <http://www.enef-haus.de> [Zugegriffen: 3. März 2014].
- [228] VDI 2067, 2000. *Economic efficiency of building installations - Fundamentals and economic calculation*, Düsseldorf.

- [229] Verhoog, M., 2012. *Evaluation des Modernisierungsratgebers - Ergebnisbericht*, Berlin: co2online gGmbH.
URL: http://www.klima-sucht-schutz.de/fileadmin/CO2online/PDF_Evaluationen/2012_Evaluation_Modernisierungsratgeber_co2online_gGmbH.pdf [Zugegriffen: 24. März 2014].
- [230] Vermittlungsausschuss Bundestag/Bundesrat, 2012. *Beschlussempfehlung des Vermittlungsausschusses zu dem Gesetz zur steuerlichen Förderung von energetischen Sanierungen an Wohngebäuden*.
- [231] Volk, R., J. Stengel & F. Schultmann, 2013. Compilation of regional building stock inventories under uncertainty. In: *Proceedings of the Sustainable Buildings Conference in Singapore (SB13) – Realising Sustainability in the Tropics*. Singapore, S. 493-500.
URL: http://www.iip.kit.edu/downloads/CIB_W115_2013_chronological_order.pdf [Zugegriffen: 24. März 2014].
- [232] Walberg, D., A. Holz, T. Gniechwitz & T. Schulze, 2011. *Wohnungsbau in Deutschland 2011 - Modernisierung oder Bestandsersatz - Studie zum Zustand und der Zukunftsfähigkeit des deutschen „Kleinen Wohnungsbaus“*, Kiel: Arbeitsgemeinschaft für zeitgemäßes Bauen e.V.
URL: http://www.impulse-fuer-den-wohnungsbau.de/w/files/studien-etc/textband-gesamt_2011-04-28.pdf [Zugegriffen: 24. März 2014].
- [233] Wallbaum, H., N. Heeren, M. Jakob, G. Martius & N. Gross, 2010. *Gebäudeparkmodell Zürich - Büro-, Schul- und Wohngebäude - Vorstudie zur Erreichbarkeit der Ziele der 2000-Watt-Gesellschaft für den Gebäudepark der Stadt Zürich*, Zürich: Stadt Zürich.
URL: <http://www.greenbuilding.ch/dbFile/124/Geb%C3%A4udeparkmodell%20Stadt%20Z%C3%BCrich.pdf> [Zugegriffen: 24. März 2014].
- [234] Weiß, J. & E. Dunkelberg, 2010. *Erschließbare Energieeinsparpotenziale im Ein- und Zweifamilienhausbestand - Eine Untersuchung des energetischen Ist-Zustands der Gebäude, aktueller Sanierungsraten, theoretischer Einsparpotenziale sowie deren Erschließbarkeit*, Ber-

lin: Institut für ökologische Wirtschaftsforschung.
URL: <http://www.enef-haus.de> [Zugegriffen: 24. März 2014].

- [235] Weiß, J. & T. Vogelpohl, 2010. *Politische Instrumente zur Erhöhung der energetischen Sanierungsquote bei Eigenheimen - Eine Analyse des bestehenden Instrumentariums in Deutschland und Empfehlungen zu dessen Optimierung vor dem Hintergrund der zentralen Einsparpotenziale und der Entscheidungssituation der Hausbesitzer/innen*, Berlin: Institut für ökologische Wirtschaftsforschung.
URL: <http://www.enef-haus.de> [Zugegriffen: 24. März 2014].
- [236] Wietschel, M., W. Fichtner & O. Rentz, 2002. *Regenerative Energieträger: der Beitrag und die Förderung regenerativer Energieträger im Rahmen einer Nachhaltigen Energieversorgung*, Landsberg: Ecomed.
- [237] Wilson, C. & H. Dowlatabadi, 2007. Models of Decision Making and Residential Energy Use. *Annual Review of Environment and Resources*, 32(1), S. 169–203.
- [238] Wischermann, S. & H.J. Wagner, 2011. Typisierung im Gebäudebereich als Planungswerkzeug zur Energie- und CO₂-Einsparung. In: *7. Internationale Energiewirtschaftstagung*. Wien, S. 1–18.
- [239] Wittmann, T., 2008. *Agent-based Models of Energy Investment Decisions*, Dissertation: Technische Universität Berlin. Berlin: Physica-Verlag, Heidelberg.
- [240] Wittmann, T. & T. Bruckner, 2007. Agentenbasierte Modellierung urbaner Energiesysteme. *Wirtschaftsinformatik*, 49(5), S. 352–360.
- [241] WoGG, 2013. *Wohngeldgesetz*.
- [242] Yücel, G. & E. Pruyt, 2011. Energy Transition in The Dutch Dwelling Stock Exploring the Extent of Inertia Against Change. In: *The 29th International Conference of the System Dynamics Society*. Washington, DC, S. 1–22.

- [243] Zhang, T., P.-O. Siebers & U. Aickelin, 2012. A three-dimensional model of residential energy consumer archetypes for local energy policy design in the UK. *Energy Policy*, 47(0), S. 102–110.
- [244] Zhao, F., 2012. *Agent-based modeling of commercial building stocks for energy policy and demand response analysis*, Dissertation: Georgia Institute of Technology. Atlanta.
URL: <http://hdl.handle.net/1853/43704>
[Zugegriffen: 24. März 2014].

PRODUKTION UND ENERGIE

Karlsruher Institut für Technologie (KIT)



Institut für Industriebetriebslehre und Industrielle Produktion
Deutsch-Französisches Institut für Umweltforschung

ISSN 2194-2404

Die Bände sind unter www.ksp.kit.edu als PDF frei verfügbar
oder als Druckausgabe zu bestellen.

- Band 1** **National Integrated Assessment Modelling zur Bewertung umweltpolitischer Instrumente.**
Entwicklung des otello-Modellsystems und dessen Anwendung auf die Bundesrepublik Deutschland. 2012
ISBN 978-3-86644-853-7
- Band 2** **Erhöhung der Energie- und Ressourceneffizienz und Reduzierung der Treibhausgasemissionen in der Eisen-, Stahl- und Zinkindustrie (ERESTRE).** 2013
ISBN 978-3-86644-857-5
- Band 3** Frederik Trippe
Techno-ökonomische Bewertung alternativer Verfahrenskonfigurationen zur Herstellung von Biomass-to-Liquid (BtL) Kraftstoffen und Chemikalien. 2013
ISBN 978-3-7315-0031-5
- Band 4** Dogan Keles
Uncertainties in energy markets and their consideration in energy storage evaluation. 2013
ISBN 978-3-7315-0046-9
- Band 5** Heidi Ursula Heinrichs
Analyse der langfristigen Auswirkungen von Elektromobilität auf das deutsche Energiesystem im europäischen Energieverbund. 2013
ISBN 978-3-7315-0131-2



Band 6 Julian Stengel
Akteursbasierte Simulation der energetischen
Modernisierung des Wohngebäudebestands
in Deutschland. 2014
ISBN 978-3-7315-0236-4



In der Dissertation wird das akteursbasierte Wohngebäude- und Haushaltsmodell AWOHM zur Identifizierung und Konzipierung adäquater Bündel umweltpolitischer Instrumente im Themenfeld Wärmenutzung mit Fokus auf der energetischen Modernisierung entwickelt und auf die Bundesrepublik Deutschland angewandt. Die Beurteilung der Adäquatheit von Instrumentenbündeln orientiert sich an der deutschen Nachhaltigkeitsstrategie. Dabei werden insbesondere auch Luftschadstoffemissionen sowie deren räumliche Verteilung, Umverteilungswirkungen und finanzielle Überlastungen einkommensschwacher Haushalte in die Betrachtung einbezogen. Durch die Modellierung der Gebäude und Haushalte auf Mikroebene wird eine hemmnis- und potenzialgetriebene Neu-/Umgestaltung umweltpolitischer Instrumente sowie deren Anpassung an unterschiedliche Zielgruppen mittels auf der Clusteranalyse basierender Verfahren ermöglicht.

Mittels AWOHM werden Entwicklungspfade des Wohngebäude- und Haushaltsbestands in Deutschland bis 2030 simuliert und bewertet. Es werden technische, ökonomische und ausschöpfbare Emissionsreduktionspotenziale bestimmt sowie umweltpolitische Instrumentenbündel zusammengestellt, die an die Charakteristika der Gebäude, Eigentümer und Bewohner angepasst sind.

ISSN 2194-2404

ISBN 978-3-7315-0236-4

