

*Band 15* \_ PRODUKTION UND ENERGIE

Robert Kunze

TECHNO-ÖKONOMISCHE PLANUNG ENERGETISCHER  
WOHNGEBÄUDEMODERNISIERUNGEN

EIN GEMISCHT-GANZZAHLIGES LINEARES OPTIMIERUNGSMODELL  
AUF BASIS EINER VOLLSTÄNDIGEN FINANZPLANUNG



Robert Kunze

## **Techno-ökonomische Planung energetischer Wohngebäudemodernisierungen**

Ein gemischt-ganzzahliges lineares Optimierungsmodell  
auf Basis einer vollständigen Finanzplanung

## PRODUKTION UND ENERGIE

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

Band 15

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

# **Techno-ökonomische Planung energetischer Wohngebäude- modernisierungen**

Ein gemischt-ganzzahliges lineares  
Optimierungsmodell auf Basis einer  
vollständigen Finanzplanung

von  
Robert Kunze

Dissertation, Karlsruher Institut für Technologie (KIT)  
Fakultät für Wirtschaftswissenschaften, 2015  
Referenten: Prof. Dr. Wolf Fichtner  
Prof. Dr. Thomas Lützkendorf  
Prof. Dr. Dominik Möst

## 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](http://www.ksp.kit.edu)



*This document – excluding the cover, pictures and graphs – 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 2016

ISSN 2194-2404

ISBN 978-3-7315-0531-0

DOI 10.5445/KSP/1000054969





# Techno-ökonomische Planung energetischer Wohngebäudemodernisierungen

Ein gemischt-ganzzahliges lineares Optimierungsmodell  
auf Basis einer vollständigen Finanzplanung

Zur Erlangung des akademischen Grades eines  
Doktors der Ingenieurwissenschaften  
(Dr.-Ing.)

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

DISSERTATION

von

Diplom-Ingenieur, Diplom-Wirtschaftsingenieur Robert Kunze

Tag der mündlichen Prüfung: 21. Dezember 2015

Referent: Prof. Dr. Wolf Fichtner

Korreferenten: Prof. Dr. Thomas Lützkendorf

Prof. Dr. Dominik Möst



für

Tristan und Arved



# Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Industriebetriebslehre und Industrielle Produktion (IIP) des Karlsruher Instituts für Technologie (KIT).

Ich danke meinem Doktorvater Herrn Prof. Dr. Wolf Fichtner für die Betreuung und stetige Förderung meiner Arbeit, für die fachliche und persönliche Unterstützung sowie für das in mich gesetzte Vertrauen. Herrn Prof. Dr. Thomas Lützkendorf und Herrn Prof. Dr. Dominik Möst danke ich für die Übernahme der Korreferate.

Für das stets angenehme Arbeitsklima und die konstruktiven Diskussionen bin ich meinen derzeitigen und ehemaligen Kollegen sehr verbunden. Mein besonderer Dank richtet sich an Julian, René, Witold, Dogan, Rupert, Philipp, Elias, Rebekka, Karoline, Anna, Thomas, Alexandra, Simon, Erik, Lutz, Christoph und Massimo.

Nicht zuletzt gilt mein innigster Dank meiner Familie für ihr Verständnis und ihre unbedingte Unterstützung während der Anfertigung der Arbeit.

Robert Kunze

Karlsruhe, im Dezember 2015



# Kurzfassung

In der Dissertation wird ein gemischt-ganzzahliges lineares Optimierungsmodell zur Entscheidungsunterstützung von Wohngebäudeeigentümern bei der energetischen Modernisierungsplanung entwickelt und für zwei exemplarische Fallstudien angewendet. Im Fokus stehen Entscheidungsträger in Form natürlicher Personen.

Die energetische Modernisierung des deutschen Wohngebäudebestandes stellt einen zentralen Pfeiler im Energiekonzept der Bundesregierung dar. Einem Gebäudeeigentümer als Initiator von Modernisierungsmaßnahmen bietet sich ein beachtlicher techno-ökonomischer Handlungsspielraum hinsichtlich des Einsatzes verschiedener Energietechnologien und der Umsetzung von Wärmeschutzmaßnahmen sowie der Inanspruchnahme staatlicher Fördermittel. Die gängige Praxis der Modernisierungsplanung wird diesem Umstand nur unzureichend gerecht, indem einzelne Maßnahmenbündel lediglich einer Prüfung auf Wirtschaftlichkeit unterzogen werden. Die Auswahl der Maßnahmen und der Finanzierungsmittel erfolgt dabei stets sukzessiv. So können vorteilhaftere Alternativen unerkannt bleiben oder die verfügbaren Finanzierungsmittel werden gegebenenfalls ineffektiv eingesetzt. In der Literatur vorgestellte Optimierungsmodelle sind dagegen in der Lage, den techno-ökonomischen Handlungsspielraum umfassend in die Modernisierungsplanung einzubeziehen. Jedoch ist festzustellen, dass mit ihnen ausschließlich die Perspektive selbstnutzender Gebäudeeigentümer eingenommen wird. Die Entscheidungssituation eines Vermieters bleibt ebenso unbeachtet wie die Aspekte der Maßnahmenfinanzierung oder die Möglichkeiten zur Bewirtschaftung stromerzeugender Anlagen.

In dieser Arbeit wird eine Methodik zur integrierten Abbildung der techno-ökonomischen Handlungsoptionen und zur Bestimmung der aus wirtschaftlicher Sicht für den Eigentümer vorteilhaftesten Handlungsalternative zur Modernisierung seines Wohngebäudes entwickelt. Der Ansatz ermöglicht die simultane Betrachtung der Maßnahmenwahl und -auslegung, des Versorgungsanlageneinsatzes einschließlich der Möglichkeiten zur Bewirtschaftung von stromerzeugenden Anlagen sowie der Wahl der Finanzierungsmittel unter Beachtung der relevanten Einflussgrößen und Rahmenbedingungen des Gebäudeeigentümers als Selbstnutzer und/oder Vermieter. Das ökonomische Bewertungsschema beruht auf einer vollständigen Finanzplanung

und erlaubt, staatliche Fördermittel in Form von verschiedenen Zuschüssen und zinsverbilligten Darlehen adäquat in die Analyse einzubeziehen.

Die Anwendung des entwickelten Modells wird anhand von zwei exemplarischen Fallstudien zur Modernisierungsplanung für ein Mehrfamilienhaus demonstriert. Dabei wird die Modernisierungsentscheidung zum einen aus der Sicht von selbstnutzenden Eigentümern und zum anderen aus dem Blickwinkel eines Vermieters des Gebäudes untersucht. Abschließend werden weitere Einsatzmöglichkeiten und Ansatzpunkte zur Erweiterung des entwickelten Modells aufgezeigt.

# Inhaltsverzeichnis

<b>Abkürzungsverzeichnis</b> .....	<b>IX</b>
<b>Abbildungsverzeichnis</b> .....	<b>XI</b>
<b>Tabellenverzeichnis</b> .....	<b>XV</b>
<b>Kapitel 1 Einleitung</b> .....	<b>1</b>
1.1 Ausgangslage und Problemstellung.....	2
1.2 Zielsetzung und Vorgehensweise .....	4
<b>Kapitel 2 Hintergründe und technische Aspekte der energetischen Wohngebäudemodernisierung</b> .....	<b>7</b>
2.1 Energieanwendungen und -verbrauch in Wohngebäuden.....	8
2.2 Struktur und energetischer Status Quo des deutschen Wohngebäudebestands .....	10
2.3 Struktur der Wohngebäudeeigentümer und ihre Modernisierungsmotive und -hemmnisse .....	14
2.4 Das Energiesystem „Wohngebäude“ .....	17
2.4.1 Heizwärmebedarf in Wohngebäuden und Maßnahmen zu dessen Reduktion.....	19
2.4.2 Energieerzeugung in Wohngebäuden .....	23
2.4.3 Energiespeicherung in Wohngebäuden.....	27
2.4.4 Wärmeverteilung in Wohngebäuden.....	31
<b>Kapitel 3 Rechtliche Rahmenbedingungen zur energetischen Wohngebäudemodernisierung</b> .....	<b>33</b>
3.1 Energierichtsrahmen und Förderinstrumente .....	33
3.1.1 Energieeinsparungsgesetz.....	34
3.1.2 Energieeinsparverordnung.....	35
3.1.3 Erneuerbare-Energien-WärmeGesetze .....	36
3.1.4 Erneuerbare-Energien-Gesetz .....	37
3.1.5 Kraft-Wärme-Kopplungs-Gesetz.....	38

3.1.6 Weitere relevante Regelungen für den Stromanlagenbetrieb.....	40
3.1.7 Staatliche Fördermittel zur Anfangsfinanzierung von energetischen Wohngebäudemodernisierungen.....	40
3.2 Mietrechtsrahmen.....	42
3.2.1 Das Vergleichsmietpreisniveau .....	43
3.2.2 Modernisierungsumlage nach § 559 BGB .....	44
3.2.3 Mietpreisanpassung nach § 558 BGB.....	45
3.2.4 Mieterhöhungskombinationen.....	46
3.2.5 Anrechnung von staatlichen Fördermitteln.....	47
3.2.6 Mietpreis bei Neuvermietung.....	49
3.2.7 Betriebskostenverordnung und Heizkostenverordnung.....	49
3.3 Steuerrechtsrahmen.....	50
3.3.1 Einkommensteuer.....	51
3.3.2 Umsatzsteuer .....	53
<b>Kapitel 4 Vorüberlegungen zur Modellentwicklung .....</b>	<b>57</b>
4.1 Die Entscheidungssituation „Wohngebäudemodernisierung“ .....	59
4.1.1 Technische Aspekte der Entscheidungssituation .....	59
4.1.2 Ökonomische Aspekte der Entscheidungssituation .....	60
4.1.3 Zeitlicher Aspekt der Entscheidungssituation .....	62
4.1.4 Unsicherheitsaspekte der Entscheidungssituation.....	63
4.2 Überblick zu existierenden Arbeiten und Ansätzen.....	67
4.2.1 Ansätze zur Einzelbewertung und Variantenvergleiche .....	68
4.2.2 Optimierungsmodelle mit integrierter Gebäudesimulation .....	71
4.2.3 Optimierungsmodelle ohne integrierte Gebäudesimulation.....	73
4.2.4 Zusammenfassende Wertung der existierenden Ansätze.....	76
4.3 Anforderungen an das zu entwickelnde Modell .....	78
4.4 Definition der Modellzielgrößen.....	81
4.5 Vorüberlegungen zur Modellierungs- und Analysemethode für das zu entwickelnde Modell .....	85
4.5.1 Abbildung der techno-ökonomischen Entscheidungsaspekte .....	85
4.5.2 Art der Problemformulierung und Auswahl des Lösungsverfahrens.....	88
4.5.3 Abbildung der techno-ökonomischen Beziehungsstrukturen.....	91

---

4.6	Vorüberlegungen zum ökonomischen Bewertungsschema für das zu entwickelnde Modell.....	97
4.6.1	Problemstruktur aus Sicht der Investitionsrechnung.....	97
4.6.2	Diskussion und Auswahl des Investitionsrechenverfahrens....	99
4.6.3	Eckpunkte zur Umsetzung der vollständigen Finanzplanung.....	102
4.7	Vorüberlegungen zur Berücksichtigung von Unsicherheiten der Modernisierungsplanung.....	110
4.8	Zusammenfassende methodische Einordnung des zu entwickelnden Modells.....	115
<b>Kapitel 5</b>	<b>Entwicklung des <i>BRIAMO</i>-Modells.....</b>	<b>117</b>
5.1	Modellierung der Gebäudeenergiesystemstruktur.....	119
5.2	Modellierung der Analysezeitraumstruktur.....	121
5.3	Modellierung der Investor- und Finanzplanstruktur.....	122
5.4	Modellierung des Energieflussgraphen.....	124
5.4.1	Modelltreiber – Deckung des Energiebedarfs.....	124
5.4.2	Knotenenergiebilanzgleichungen und Konsistenzglei- chungen zur Berücksichtigung verschiedener Zeitbezüge.....	124
5.4.3	Energiebereitstellung an der Gebäudegrenze.....	126
5.5	Modellierung der technischen Entscheidungsaspekte.....	126
5.5.1	Energieumwandlungsanlagen.....	127
5.5.2	Energiespeicher.....	128
5.5.3	Gebäudeinterne Wärmeverteilung.....	133
5.5.4	Maßnahmen an der Gebäudehülle.....	135
5.5.5	Lüftung und Heizwärmerückgewinnung.....	138
5.5.6	Hilfsenergiebedarf.....	138
5.5.7	Systementwicklung.....	139
5.6	Modellierung der ökonomischen Entscheidungsaspekte.....	143
5.6.1	Finanzplankonten.....	143
5.6.2	Anfangsauszahlungen und Finanzierungsstruktur.....	146
5.6.3	Kapitaldienste für langfristige Fremdfinanzierung.....	150
5.6.4	Auszahlungen für Instandhaltung und Anlagenbetrieb.....	153
5.6.5	Einzahlungen aus der Bewirtschaftung von KWK- und PV-Anlagen.....	154
5.6.6	Einzahlungen aus der Gebäudebewirtschaftung.....	156
5.6.7	Absetzung für Abnutzung.....	160
5.7	Zielfunktionen.....	162

<b>Kapitel 6</b>	<b>Modellgestützte Analysen der Modernisierungsentscheidung.....</b>	<b>165</b>
6.1	Definition der Fallstudien und Szenarien .....	165
6.2	Modellaufbau und Datengrundlage .....	167
6.2.1	Gebäudeausgangszustand .....	168
6.2.2	Systemgestaltungsoptionen zur Modernisierung.....	169
6.2.3	Energiebedarfsstruktur .....	171
6.2.4	Anlageneinsatz und Energiebedarfsdeckung .....	175
6.2.5	Energiepreise .....	178
6.2.6	Rahmenbedingungen der Anlagenbewirtschaftung.....	179
6.2.7	Rahmenbedingungen der Vermietung.....	180
6.2.8	Rahmenbedingungen der Finanzplanung.....	182
6.3	Ergebnisse der modellgestützten Fallstudienanalyse.....	186
6.3.1	Fallstudie „Eigennutzer“ – Ergebnisse der Basisszenarien ....	186
6.3.2	Fallstudie „Vermieter“ – Ergebnisse der Basisszenarien .....	192
6.4	Auswirkung einer Variation unsicherer Parameter.....	199
6.4.1	Variation der Energiepreis- und der Zinssatz- entwicklung für das Basisszenario E_INST.....	200
6.4.2	Variation der Vergleichsmietpreis- und der Zinssatz- entwicklung für das Basisszenario V_INST.....	205
6.5	Problemgröße und Modellperformance.....	210
<b>Kapitel 7</b>	<b>Schlussfolgerungen und Ausblick.....</b>	<b>213</b>
7.1	Zum entwickelten Analyseinstrument <i>BRIAMO</i> .....	213
7.2	Schlussfolgerungen aus den Fallstudien .....	216
7.2.1	Eigennutzerfallstudie .....	217
7.2.2	Vermieterfallstudie .....	221
7.3	Kritische Würdigung des Analyseansatzes .....	224
7.3.1	Zur Erfassung der ökonomischen Konsequenzen aus der Gestaltung des Gebäudeenergiesystems.....	224
7.3.2	Zum Bewertungsverfahren „Vollständige Finanzplanung“ ....	225
7.3.3	Zur Berücksichtigung von Steuern.....	227
7.4	Weitere Einsatz- und Analyseoptionen von <i>BRIAMO</i> .....	228
7.5	Ansatzpunkte für die Modellweiterentwicklung.....	229
<b>Kapitel 8</b>	<b>Zusammenfassung .....</b>	<b>231</b>
<b>Anhang</b> .....	<b>239</b>	
<b>Nomenklatur</b> .....	<b>255</b>	
<b>Literaturverzeichnis</b> .....	<b>263</b>	

# Abkürzungsverzeichnis

AC	Alternating Current / Wechselstrom
AEK	Auslegungs- und Einsatzkonstellation der Versorgungsanlagen
AfA	Absetzung für Abnutzung
AW	Außenwand
BAFA	Bundesamt für Wirtschaft und Ausfuhrkontrolle
DC	Direct Current / Gleichstrom
EE	Erneuerbare Energien
EFH	Einfamilienhaus
EH	Siehe KfW-EH
EK	Eigenkapital
EVU	Energieversorgungsunternehmen
FK	Fremdkapital
GAMS	General Algebraic Modelling System
GHD	Gewerbe, Handel, Dienstleistungen
GMH	Großes Mehrfamilienhaus mit mehr als 12 Wohneinheiten
IKT	Informations- und Kommunikationstechnologien
KD	Kellerdecke
KfW	Kreditanstalt für Wiederaufbau
KfW-EH	KfW-Effizienzhaus
KWK	Kraft-Wärme-Kopplung
MFH	Mehrfamilienhaus mit 3 bis 12 Wohneinheiten
MILP	Mixed Integer Linear Program
OGD	Oberste Geschossdecke
OVM	Ortsüblicher Vergleichsmietpreis
PCM	Phase Change Material
PV	Photovoltaik
RH	Doppel- oder Reihenhaus mit 1 bis 2 Wohneinheiten
WRG	Wärmerückgewinnung
WSchVergl	Wärmeschutzverglasung
WWZ	Warmwasserzirkulation



# Abbildungsverzeichnis

<b>Abbildung 1:</b>	Durchschnittliche Struktur des Endenergieverbrauchs in Deutschland und in deutschen Haushalten sowie der Energieträgereinsatz nach Anwendungsbereichen in den Jahren 2008-2012 .....	8
<b>Abbildung 2:</b>	Typischer wohnflächenspezifischer Endenergiebedarf für Raumwärme und Warmwasser (Referenzklima Deutschland) für Wohngebäude in verschiedenen Größen- und Baualterklassen im Erbauungszustand und nach der Umsetzung von Modernisierungsmaßnahmen .....	12
<b>Abbildung 3:</b>	Eigentümerstruktur der Gebäude im Wohngebäudebestand .....	15
<b>Abbildung 4:</b>	Nutzungs- und Eigentümerstruktur der Wohneinheiten im Wohngebäudebestand.....	15
<b>Abbildung 5:</b>	Schematische Darstellung des Wohngebäudeenergiesystems .....	18
<b>Abbildung 6:</b>	Schematische Darstellung des Solarwärmegewinns durch ein Fenster .....	20
<b>Abbildung 7:</b>	Schematische Darstellung des Wärmeverlustes durch ein opakes Außenbauteil .....	21
<b>Abbildung 8:</b>	Strukturelemente zur Modellierung des Gebäudeenergiesystems .....	119
<b>Abbildung 9:</b>	Modellierung der Analysezeitraumstruktur .....	121
<b>Abbildung 10:</b>	Modellierung der Investor- und Finanzplanstruktur .....	123
<b>Abbildung 11:</b>	Modellierung von Energieumwandlungsanlagen .....	127

<b>Abbildung 12:</b>	Modellierung von Energiespeichern .....	128
<b>Abbildung 13:</b>	Modellierung von Dämmmaßnahmen für eine zentrale Warmwasserverteilung mit Zirkulation.....	134
<b>Abbildung 14:</b>	Modellierung des Heizwärmebedarfs – Fenster bzw. transparente Hüllflächen.....	135
<b>Abbildung 15:</b>	Modellierung des Heizwärmebedarfs – Dämmung opaker Hüllflächen.....	136
<b>Abbildung 16:</b>	Schrittweise lineare Approximation der erforderlichen Anfangsauszahlungen.....	147
<b>Abbildung 17:</b>	Modellierung der KWK-Anlagenbewirtschaftung durch einen Vermieter.....	154
<b>Abbildung 18:</b>	Heizlastverlauf am Wintertypstag in Abhängigkeit der genutzten Fenstervariante bei unverändertem Dämmstandard der opaken thermischen Hülle.....	171
<b>Abbildung 19:</b>	Heizlastverlauf am Wintertypstag für die Fenstervariante mit zweifacher Wärmeschutzverglasung in Abhängigkeit der Dämmung einzelner opaker Flächen der thermischen Gebäudehülle .....	172
<b>Abbildung 20:</b>	Gegenüberstellung des simulierten und des aus den Einzeleffekten errechneten Heizlastverlaufs für die Kombination von Wärmeschutzmaßnahmen .....	173
<b>Abbildung 21:</b>	Mittlere Bedarfsprofile der Nutzerzone für Elektroenergie und Warmwasser .....	174
<b>Abbildung 22:</b>	Zusammensetzung der mittleren kalkulatorischen Kosten der Eigenversorgung durch die stromerzeugenden Anlagen für das Szenario E_FREI .....	189
<b>Abbildung 23:</b>	Zusammensetzung der mittleren kalkulatorischen Kosten der Eigenversorgung durch die stromerzeugenden Anlagen für das Szenario E_INST .....	190

---

<b>Abbildung 24:</b>	Entwicklung des monatlichen Nettomietpreises der Bestandsmieter zum Umsetzungszeitpunkt für das Szenario V_FREI.....	194
<b>Abbildung 25:</b>	Entwicklung des monatlichen Nettomietpreises der Bestandsmieter zum Umsetzungszeitpunkt für das Szenario V_INST.....	196
<b>Abbildung 26:</b>	Entwicklung des monatlichen Nettomietpreises der Bestandsmieter zum Umsetzungszeitpunkt für das Szenario V_MPEB .....	198
<b>Abbildung 27:</b>	Ergebnisse verschiedener Energiepreis- und Zinssatzentwicklungen für das Szenario E_INST .....	201
<b>Abbildung 28:</b>	Ergebnisse verschiedener Vergleichsmietpreis- und Zinssatzentwicklungen für das Szenario V_INST .....	206



# Tabellenverzeichnis

<b>Tabelle 1:</b>	Alters- und Größenstruktur des deutschen Wohngebäudebestands mit Baujahr bis 2009.....	11
<b>Tabelle 2:</b>	Handlungsmotive und -hemmnisse für eine energetische Wohngebäudemodernisierung aus Eigentümersicht.....	16
<b>Tabelle 3:</b>	Übersicht zu Dämmstoffen.....	21
<b>Tabelle 4:</b>	Entscheidungsrelevante Einflussgrößen im Rahmen der Gebäudemodernisierungsplanung und ihre Unsicherheitsdimension.....	64
<b>Tabelle 5:</b>	In der Literatur vorgestellte entscheidungsvorbereitende Ansätze zur Gestaltung eines Gebäudeenergiesystems unter wirtschaftlichen Gesichtspunkten und die dabei berücksichtigten Aspekte.....	77
<b>Tabelle 6:</b>	Wesentliche Modellentscheidungsgrößen (Variablen).....	87
<b>Tabelle 7:</b>	Übersicht zu den Fallstudien und Szenarien.....	166
<b>Tabelle 8:</b>	Kennwerte des betrachteten Gebäudes im Ausgangszustand.....	168
<b>Tabelle 9:</b>	Systemgestaltungsoptionen mit ausgewählten Parametern.....	170
<b>Tabelle 10:</b>	Korrekturwerte zum Energiebereitstellungspotenzial der KWK-Anlage und der Solaranlagen für den Übergangstag.....	177
<b>Tabelle 11:</b>	Preise für den Energiebezug von externen Lieferanten.....	178
<b>Tabelle 12:</b>	Rahmendaten für die Bewirtschaftung von KWK- und PV-Anlagen.....	179
<b>Tabelle 13:</b>	Vergleichsmietpreise am Gebäudestandort und Leerstandzeiten.....	180
<b>Tabelle 14:</b>	Umlagefähige Modernisierungsanteile zum Umsetzungszeitpunkt.....	181
<b>Tabelle 15:</b>	Langfristige Fremdfinanzierungsmöglichkeiten der KfW.....	183

<b>Tabelle 16:</b>	Einbezogene Investitionszuschüsse des BAFA .....	184
<b>Tabelle 17:</b>	Zinssätze für die kurzfristige und die langfristige Ergänzungs- investition sowie die kurzfristige Ergänzungsfinanzierung .....	185
<b>Tabelle 18:</b>	Ergebnisse der Basisszenarien für die Fallstudie „Eigennutzer“ .....	187
<b>Tabelle 19:</b>	Ergebnisse der Basisszenarien für die Fallstudie „Vermieter“ .....	193
<b>Tabelle 20:</b>	Finanzplan [€] zum Basisszenario E_FREI.....	240
<b>Tabelle 21:</b>	Finanzplan [€] zum Basisszenario E_INST .....	242
<b>Tabelle 22:</b>	Finanzplan [€] zum Basisszenario E_MPEB .....	244
<b>Tabelle 23:</b>	Finanzplan [€] zur Unterlassungsalternative der Eigennutzerfallstudie .....	244
<b>Tabelle 24:</b>	Finanzplan [€] zum Basisszenario V_FREI .....	246
<b>Tabelle 25:</b>	Finanzplan [€] zum Basisszenario V_INST .....	248
<b>Tabelle 26:</b>	Finanzplan [€] zum Basisszenario V_MPEB.....	250
<b>Tabelle 27:</b>	Finanzplan [€] zur Unterlassungsalternative der Vermieterfallstudie .....	252

# Kapitel 1

## Einleitung

Mit dem 2010 vorgelegten Energiekonzept und den Beschlüssen zur Energiewende 2011 hat die Bundesregierung einen tiefgreifenden Umbau des nationalen Energieversorgungssystems in den nächsten Jahrzehnten angestoßen. Deutschland verfolgt in diesem Rahmen eines der ehrgeizigsten Energie- und Klimaprogramme weltweit. Wenngleich damit versucht wird, der Klimaschutzverantwortung einer führenden Industrienation gerecht zu werden, ist die eingennommene Vorreiterrolle nicht unumstritten [231 S. 239]. Zu berücksichtigen ist aber, dass durch die langfristige Perspektive des Energiekonzeptes auch versorgungsstrategische Aspekte bedeutsam sind. Der Übergang auf lokal verfügbare Erneuerbare Energien, die Flexibilisierung der Energieversorgung und vor allem die generelle Senkung des Energiebedarfs dienen nicht nur den Belangen des Klimaschutzes, sondern verringern auch die Importabhängigkeiten des deutschen Wirtschaftsstandorts und die lokale Umweltbelastung. Gleichzeitig zielen die Maßnahmen auf eine langfristige Sicherung der Versorgung und der Energienutzbarkeit für alle Schichten der Bevölkerung ab [44 S. 3/53].

Die Umsetzung der politischen Vorgaben muss sich letztendlich in den Entscheidungen und Handlungsweisen einzelner Wirtschaftseinheiten widerspiegeln. Ein weitgehender Konsens besteht darüber, dass diese Maßnahmen ökonomisch effizient sein müssen. Eine dahin gehend Erfolg versprechende Strategie bietet sich in der Beschränkung und Bepreisung von Rechten (bspw. für CO<sub>2</sub>-Emissionen) innerhalb eines Zertifikatehandelssystems. Sofern alle Wirtschaftssubjekte darin eingebunden sind und der Markt nicht versagt, wäre diese Vorgehensweise umfassend zielführend [231 S. 243].

Alternativ zur Marktregelung können durch die Schaffung eines ordnungsrechtlichen Rahmens Handlungspflichten definiert werden. Bei dieser Vorgehensweise besteht die Schwierigkeit vor allem in der angemessenen Berücksichtigung der Leistungsfähigkeit der Wirtschaftseinheiten, welche die Maßnahmen zu tragen haben. Die Bestimmung eines ausgewogenen Anforderungsmaßes – in den politischen Leitlinien oftmals als

„wirtschaftliche Vertretbarkeit“ bezeichnet – ist deshalb Gegenstand zahlreicher Kontroversen. Die Ursache ist in den unterschiedlichen Blickwinkeln der beteiligten Akteure zu sehen, aus denen sich abweichende Bewertungen ergeben. Während für die staatliche Seite die gesamtwirtschaftliche Perspektive maßgebend ist und dabei bspw. auch die Auswirkungen auf die Beschäftigung und die Steuereinnahmen ins Kalkül einbezogen werden, beurteilt ein Investor die Vorteilhaftigkeit seiner Handlungsoptionen aus einzelwirtschaftlicher Sicht. Für ihn stehen die Einflussgrößen seines eigenen Entscheidungsraumes im Vordergrund. Um möglichen Zielkonflikten entgegenzuwirken, setzt der Staat Förderinstrumente ein. Diese sollen einzelwirtschaftliche Nachteile abfedern und die Handlungen der relevanten Entscheidungsträger in die gewünschte Richtung vorantreiben.

Zur Erreichung der energie- und klimapolitischen Zielsetzungen kommen in Deutschland sowohl marktbasierende als auch auf staatlichen Instrumenten beruhende Regelungsmechanismen zum Einsatz. Zur Erfüllung der Zielvorgaben, die im Rahmen der Energiewende für den Gebäudesektor definiert wurden, wird letzterer Weg beschritten.

## 1.1 Ausgangslage und Problemstellung

Der Gebäudesektor (Wohn- und Nichtwohngebäude) ist in Deutschland für ca. 40 % der Endenergienutzung und ca. 30 % der CO<sub>2</sub>-Emissionen verantwortlich. Die nachhaltige Senkung des Energiebedarfs und der vorrangige Einsatz erneuerbarer Energieträger in diesem Sektor stellen deshalb zentrale Pfeiler im Energiekonzept der Bundesregierung dar [44<sup>S. 22</sup>]. Flankiert durch zahlreiche Förderinstrumente und Informationskampagnen wurde in den letzten Jahren ein umfangreiches Bündel an Gesetzen und Verordnungen erlassen, um die Erfüllung dieser Ziele zu forcieren. Bis 2050 soll die Energienutzung des gesamten Gebäudebestands weitgehend klimaneutral erfolgen. Der wesentliche Beitrag muss durch die schrittweise energetische Modernisierung der Altbauten geleistet werden, von denen rund 64 % vor dem Inkrafttreten der ersten Wärmeschutzverordnung 1977 errichtet wurden [75/77<sup>S. 39</sup>].

Während der energetische Standard von Neubauten durch Anpassung des Rechtsrahmens an die Zielvorgaben herangeführt werden kann, sind die staatlichen Einflussmöglichkeiten bei bestehenden Gebäuden durch den grundgesetzlich verankerten Bestandsschutz eingeschränkt. Nur im Zusammenhang mit wesentlichen Änderungen bzw. Instandsetzungen, die durch den Gebäudeeigentümer zu initiieren sind, können verbindliche Vorgaben greifen. Die Wirtschaftlichkeit von Modernisierungen kann somit die Entscheidung zur Maßnahmenumsetzung beeinflussen, stellt

aber in jedem Fall ein wichtiges Beurteilungskriterium dar, inwieweit der Umfang der Modernisierung über die gesetzlichen Mindestanforderungen hinausreicht.

Dem Gebäudeeigentümer bietet sich dabei ein beachtlicher Handlungsspielraum hinsichtlich des Einsatzes verschiedener Technologien zur effizienten Energiebereitstellung und Maßnahmen zur effektiven Energienutzung. Diese unterliegen zahlreichen Wechselwirkungen (bspw. hinsichtlich ihrer Auslegung und ihres Energieeinsparpotenzials), welche einen starken Einfluss auf ihre Wirtschaftlichkeit haben können. Die gängige Praxis zur Entscheidungsfindung wird diesem Umstand oftmals nur unzureichend gerecht, indem Einzelmaßnahmen isoliert beurteilt werden oder eine vergleichende Gegenüberstellung einzelner Maßnahmenbündel erfolgt. Gleiches gilt für die Finanzierungsmöglichkeiten. Hier bestehen Abhängigkeiten zwischen der Maßnahmenwahl und dem breit gefächerten staatlichen Fördermittelangebot. Die Zusammenstellung des Maßnahmenbündels und die Festlegungen zur Finanzierung werden in der Regel sukzessiv vorgenommen und müssen nicht selten lediglich einer Prüfung auf Wirtschaftlichkeit und Umsetzbarkeit standhalten. Gegebenenfalls erfolgt im beschränkten Umfang ein Abgleich von Maßnahmenwahl und Finanzierungsentscheidung oder Letztere stellt sogar den Ausgangspunkt für die Maßnahmenwahl dar, um den Zugriff auf bestimmte staatliche Förderinstrumente durch das Erreichen der gestellten Anforderungswerte zu ermöglichen.

Mit Blick auf die Vielzahl an technischen und finanziellen Gestaltungsmöglichkeiten zur Gebäudemodernisierung kann diese Vorgehensweise unmöglich erschöpfend sein. So ist zu unterstellen, dass aus ökonomischer Sicht vorteilhaftere Handlungsalternativen für den Eigentümer unerkannt bleiben oder dass die verfügbaren Finanzierungsmittel ineffektiv hinsichtlich des erreichbaren Modernisierungsgrades eingesetzt werden. Diese Ungewissheit kann zur Verunsicherung der Gebäudeeigentümer beitragen und ein wichtiges Hemmnis zur Maßnahmenumsetzung darstellen [249<sup>S. 46</sup>]. Auch wenn die Beurteilung solcher langfristig wirkenden Investitionen immer einer gewissen Unsicherheit unterliegt, sind Beratungsstrategien wie bspw.: *„Die Richtung muss stimmen. Es muss ein positives Gefühl bei der Bewertung der Wirtschaftlichkeit vorhanden sein.“* [8<sup>S. 11</sup>] sicherlich kein hilfreicher Ansatz, um solchen Barrieren entgegenzuwirken. Vielmehr werden Analyseinstrumente benötigt, welche die vielfältigen technischen Handlungsoptionen und die daraus resultierenden ökonomischen Konsequenzen vor dem Hintergrund der spezifischen Rahmenbedingungen des Eigentümers adäquat in die Entscheidungsfindung einbeziehen. Der Entwicklung solcher umfassenden Bewertungsansätze für die Gebäudemodernisierungsplanung wurde in der Wissenschaft und der Praxis bislang keine ausreichende Aufmerksamkeit gewidmet.

## 1.2 Zielsetzung und Vorgehensweise

Die Zielsetzung der vorliegenden Arbeit beinhaltet die Entwicklung und exemplarische Anwendung eines Modells als entscheidungsvorbereitendes Planungsinstrument für die energetische Wohngebäudemodernisierung. Die im vorangegangenen Unterkapitel geschilderte Problematik aufgreifend, soll die zu erarbeitende Methode in der Lage sein, aus einem breiten Spektrum an Handlungsalternativen diejenige zu erkennen, die aus ökonomischer Sicht die vorteilhafteste für den Entscheidungsträger darstellt. Ein wesentlicher Anspruch besteht darin, die Maßnahmenwahl und -finanzierung vor dem Hintergrund der differenzierten staatlichen Fördermittelbereitstellung integriert zu betrachten. Ebenso sollen auch nicht vorrangig wirtschaftlich begründete Präferenzen des Entscheidungsträgers Berücksichtigung finden können.

Als Entscheidungsträger stehen für die Modellentwicklung Akteure in Form natürlicher Personen im Fokus, welche (Teil-)Eigentümer von Wohngebäuden sind und im Rahmen der Planung und Umsetzung von Modernisierungen die Rollen des Initiators, Investors und gegebenenfalls Finanziers wahrnehmen.<sup>1</sup> Sie können einerseits als selbstnutzende Eigentümer (Selbstnutzer/Eigennutzer) auftreten, für die der Maßnahmeneinfluss auf ihre Energienutzungskosten die entscheidende ökonomische Bewertungsgrundlage darstellt. Andererseits kann es sich um gebäudebewirtschaftende Eigentümer (Vermieter) handeln.<sup>2</sup> Für diese stehen die Auswirkungen auf die Mieteinnahmen bei der Maßnahmenbeurteilung im Vordergrund. Mit dem Modell soll sowohl die eine oder andere Perspektive als auch die Sichtweise bei einer Kombination von Selbstnutzer- und Vermieterrolle innerhalb eines Gebäudes eingenommen werden können. Darüber hinaus besteht der Anspruch, das Betreiben von Stromerzeugungsanlagen im bzw. am Gebäude durch den Eigentümer (Anlagenbetreiber) adäquat betrachten zu können, um auch Handlungsoptionen zur Stromeigenversorgung bzw. zur Stromlieferung an Dritte in die Analyse einzubeziehen.<sup>3</sup>

Letztendlich soll das Modell für verschiedene Wohngebäude eingesetzt werden können und die individuellen Einflussgrößen auf die Entscheidungsfindung möglichst umfassend berücksichtigen. Dazu zählen insbesondere auch die steuerlichen Aspekte im Falle eines Vermieters oder Stromanlagenbetreibers.

---

<sup>1</sup> In Anlehnung an die Akteursrollensichtweise nach [185].

<sup>2</sup> In der Literatur wird der Begriff „Gebäudebewirtschaftung“ oftmals in einem etwas anderen Kontext gebraucht (vgl. bspw. [185]). Die Begriffsverwendung in der vorliegenden Arbeit zielt auf die Abgrenzung von eigener und wirtschaftlicher Nutzung durch den Eigentümer ab, unabhängig davon, ob im letzteren Fall Aufgaben (bspw. Hausverwaltung, Mieterbetreuung etc.) an externe Dienstleister übertragen werden.

<sup>3</sup> Betrachtet werden ausschließlich Stromerzeugungsanlagen die sich im (Teil-)Eigentum des Gebäudeeigentümers befinden und für deren Einsatzbereitschaft und Betrieb er letztendlich verantwortlich ist, unabhängig davon, ob dabei Aufgaben an externe Dienstleister übertragen werden.

Als Einstieg in die Thematik werden im **zweiten Kapitel** zunächst die Energieanwendungen in Wohngebäuden, die Alters- und Größenstruktur des deutschen Wohngebäudebestands sowie dessen energetischer Status Quo vorgestellt. Dies erfolgt mit dem Ziel, die Hintergründe für die tragende Rolle des Gebäudesektors im Rahmen der Energiewende zu beleuchten. Des Weiteren wird die Eigentümer-Nutzer-Struktur im Wohngebäudebestand dargestellt, um die Relevanz der Eigentümergruppe „Privatpersonen“ zu verdeutlichen, die im Fokus der vorliegenden Arbeit steht. Gleichzeitig werden wesentliche Motive und Hemmnisse für eine energetische Gebäudemodernisierung aus der Selbstnutzer- und aus der Vermietersicht betrachtet. Im Anschluss daran werden grundlegende Gesichtspunkte der Energienutzung in Wohngebäuden erörtert. In diesem Zusammenhang wird ein kurzer Überblick zu verschiedenen Technologien bzw. Maßnahmen gegeben, die im Rahmen der Modernisierungsplanung für ein Wohngebäude in Betracht gezogen werden können.

Im **dritten Kapitel** werden die staatlichen Rahmenbedingungen vorgestellt, welche die Planung von Gebäudemodernisierungen tangieren und einen Einfluss auf die wirtschaftliche Beurteilung der Maßnahmen haben können. Der Überblick beinhaltet relevante umweltpolitische Instrumente in Form energierechtlicher Vorgaben und ökonomischer Anreize für die Gebäudeeigentümer. Ebenso werden die gesetzlichen Regelungen zur Mietpreisbildung beleuchtet, welche für die Entscheidungsfindung eines Vermieters bei der Modernisierungsplanung von Bedeutung sind. Darüber hinaus werden grundlegende Regelungen zur Einkommen- und Umsatzbesteuerung im Fall der Gebäudebewirtschaftung und des Betriebs stromerzeugender Anlagen kurz erörtert.

Das **vierte Kapitel** widmet sich den methodischen Vorüberlegungen zur Modellentwicklung. Im ersten Schritt erfolgt eine Verdichtung der relevanten technischen, ökonomischen und zeitlichen Aspekte der Modernisierungsplanung mit den bestehenden Interdependenzen, welche den zu modellierenden Handlungsspielraum des Gebäudeeigentümers determinieren. In diesem Zusammenhang werden auch die Unsicherheiten im Rahmen einer Modernisierungsplanung beleuchtet. Im Anschluss daran werden verschiedene existierende Entscheidungsmodelle vorgestellt. Ziel ist das Aufzeigen der bestehenden methodischen Lücke, die mit dem zu erarbeitenden Modell geschlossen werden soll. Darauf aufbauend erfolgt der Einstieg in die Methodendiskussion und -auswahl für das neue Planungsinstrument. Ausgangspunkt bildet die Konkretisierung seines Anforderungsprofils und die Bestimmung der Eigentümerzielsetzungen, an denen die Entscheidungsfindung ausgerichtet werden soll. Danach wird die Vorgehensweise zur Modellierung des Handlungsspielraums, zur Bestimmung der vorteilhaftesten Alternative, zur Umsetzung des ökonomischen Bewertungsschemas und zum Umgang mit den bestehenden Planungsunsicherheiten

erörtert. Das Kapitel schließt mit einer zusammenfassenden methodischen Charakterisierung und Einordnung des zu entwickelnden Modells in die bestehende Modelllandschaft zur Entscheidungsunterstützung von Gebäudeeigentümern bei der energetischen Modernisierungsplanung unter wirtschaftlichen Gesichtspunkten.

Kern der Arbeit und Gegenstand des **fünften Kapitels** ist die Modellerstellung auf der Basis der im vorangegangenen Kapitel gewählten Methoden. Zunächst werden einige grundlegende Festlegungen zur räumlichen, zeitlichen und akteursspezifischen Strukturierung der abzubildenden Entscheidungssituation getroffen, bevor die formalen Modellbestandteile erarbeitet und beschrieben werden.

Im **sechsten Kapitel** wird die exemplarische Anwendung des neuen Planungsinstruments für ein Mehrfamilienhaus mit 12 Wohneinheiten vorgestellt. Zunächst wird das betrachtete Beispielgebäude näher charakterisiert, die unterstellten Ausgangslagen und Eigentümerzielsetzungen in Form von Basisszenarien definiert sowie die Annahmen zu den Rahmenbedingungen beschrieben. Die Untersuchung gliedert sich in zwei Fallstudien. In der ersten Fallstudie wird die Modernisierungsentscheidung aus der Eigennutzersicht beleuchtet. In der zweiten Fallstudie wird der Blickwinkel eines Vermieters des Gebäudes eingenommen. Im Anschluss an die Ergebnisdarstellung und -bewertung werden für jeweils ein Basisszenario in jeder Fallstudie die Auswirkungen verschiedener Entwicklungspfade unsicherer Rahmenbedingungen auf die Handlungsempfehlungen analysiert.

Mit den Schlussfolgerungen zur Arbeit im **siebenten Kapitel** wird zunächst dargelegt, dass mit dem entwickelten Modell die vorgegebenen Arbeitsziele erfüllt werden. In der Folge werden die Fallstudienresultate erneut aufgegriffen und es werden Schlussfolgerungen für das betrachtete Gebäude daraus gezogen. Darauf aufbauend wird der Analyseansatz hinsichtlich seiner Grenzen und möglicher Angriffspunkte für Kritik reflektiert. Das Kapitel schließt mit einem Ausblick auf weitere Anwendungs- bzw. Analysemöglichkeiten des neuen Modells und es werden einige Ansatzpunkte zu seiner methodischen Weiterentwicklung aufgezeigt.

Das **achte Kapitel** beinhaltet die Zusammenfassung der Arbeit.

## Kapitel 2

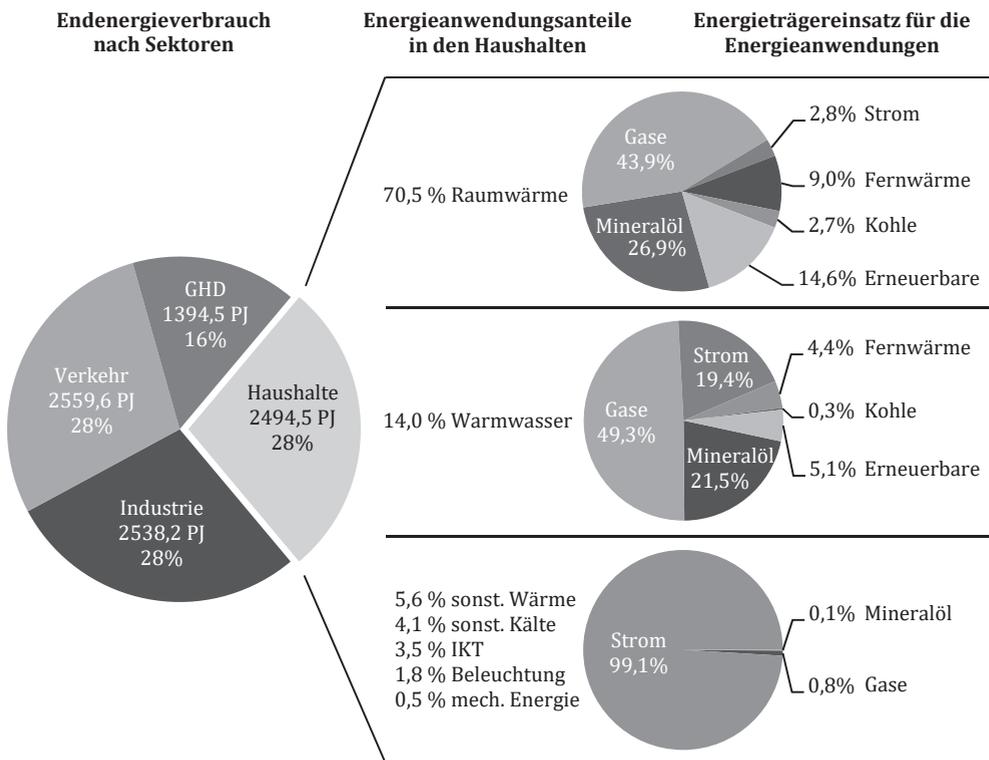
# Hintergründe und technische Aspekte der energetischen Wohngebäudemodernisierung

Um die übergeordnete Zielstellung einer langfristig sicheren, umweltschonenden und wirtschaftlich tragfähigen Energieversorgung für Deutschland zu verwirklichen, sieht das Energiekonzept der Bundesregierung bis 2050 eine Reduktion des deutschen Primärenergieverbrauchs um mindestens 50 % gegenüber 2008 vor. Diese Vorgabe soll einerseits durch die Reduktion des Endenergieverbrauchs und andererseits durch die Steigerung des Anteils Erneuerbarer Energien an der Energiebedarfsdeckung erfüllt werden. In diesem Zusammenhang wird die energetische Modernisierung des Gebäudesektors als wesentliches Handlungsfeld und zentraler Schlüssel zum Gelingen der Energiewende benannt. Bis 2050 soll der Primärenergieverbrauch des Sektors auf 20 % des Verbrauchs von 2008 gesenkt werden [44/53].

Mit Fokus auf den Wohngebäudebereich ist das Ziel dieses Kapitels, die Hintergründe für die dem Gebäudesektor beigemessene Bedeutung im Rahmen der Energiewende zu beleuchten. Hierfür wird im Unterkapitel 2.1 auf die Energieverbrauchstruktur und im Unterkapitel 2.2<sup>s. 10</sup> auf die Größen- und Altersstruktur sowie den energetischen Status Quo des deutschen Wohngebäudebestands eingegangen. Darauf aufbauend werden im Unterkapitel 2.3<sup>s. 14</sup> die Eigentümerstruktur des Gebäudebestands sowie wesentliche Motive und Hemmnisse der Eigentümer für die Umsetzung von energetischen Modernisierungsmaßnahmen betrachtet. Im Anschluss daran wird im Unterkapitel 2.4<sup>s. 17</sup> ein kurzer Überblick zu den physikalisch-technischen Aspekten der Energienutzung in Gebäuden gegeben. Einleitend erfolgt eine allgemeine Charakterisierung des Energiesystems „Wohngebäude“ bevor etwas ausführlicher auf den Heizwärmebedarf und die Handlungsoptionen zu dessen Reduktion eingegangen wird. In den darauf folgenden Abschnitten werden verschiedene Technologien und weitere Aspekte zur Energiebereitstellung und -speicherung in Wohngebäuden angesprochen.

## 2.1 Energieanwendungen und -verbrauch in Wohngebäuden

Die die durchschnittliche Struktur des Endenergieverbrauchs in Deutschland der Jahre 2008 bis 2012 zeigt Abbildung 1. Rund 28 % davon entfallen auf die privaten Haushalte. Der mit Abstand größte Teil des Haushaltsenergieverbrauchs ist der thermischen Raumklimatisierung zuzurechnen. In unseren Breitengraden handelt es sich hierbei vor allem um die Bereitstellung von Raumwärme (Heizwärme). Energieanwendungen zur Raumkühlung sowie zur Be- und Entfeuchtung der Raumluft spielen in deutschen Wohngebäuden dagegen bislang nur eine untergeordnete Rolle [29 S. 3 ff./77 S. 99/223].



**Abbildung 1:** Durchschnittliche Struktur des Endenergieverbrauchs in Deutschland und in deutschen Haushalten sowie der Energieträgereinsatz nach Anwendungsbereichen in den Jahren 2008-2012 (Datengrundlage: [4/5/229])<sup>4</sup>

<sup>4</sup> Die Energieanwendung zur Bereitstellung von Klimakälte (Raumkühlung) wird in dieser Statistik aufgrund fehlender Informationen und der bislang untergeordneten Bedeutung nicht ausgewiesen [4 S. 18].

Der zweite wesentliche Treiber des Endenergieverbrauchs der Haushalte ist die Bereitstellung von Warmwasser. Der restliche Verbrauch verteilt sich auf Energieanwendungen zur Bereitstellung von:

- sonstiger (Prozess-)Wärme für Kochen, Wäschetrocknen, Wassererwärmung in Wasch- und Spülmaschinen,
- sonstiger (Prozess-)Kälte zum Kühlen und Gefrieren von Lebensmitteln,
- IKT-Diensten (Übermittlung, Speicherung, Umwandlung von Informationen),
- künstlichem Licht/Beleuchtung und
- mechanischer Energie – bspw. zum Antrieb von Wasch- und Spülmaschinen.

Die Übersicht verdeutlicht, dass im Wohngebäudebereich die Wärmenutzung das vorrangige Handlungsfeld zur Erreichung der energie- und klimapolitischen Zielsetzungen darstellt. Dementsprechend zielt der energetische Modernisierungsbegriff für Wohngebäude vor allem auf Maßnahmen ab, die den Endenergieverbrauch der thermischen Anwendungen zur Bereitstellung von Raumwärme und Warmwasser sowie den damit verbundenen Hilfsenergieeinsatz reduzieren bzw. den Nutzungsanteil Erneuerbarer Energien in diesem Bereich erhöhen. Vor diesem Hintergrund beinhaltet das Energiekonzept die Vorgabe, dass bis 2020 der Wärmebedarf des Gebäudesektors gegenüber 2008 um 20 % verringert werden soll.

Die anderen, vorrangig elektrischen Energieanwendungen beinhalten durch den Einsatz energieeffizienter Beleuchtungsmittel und Haushaltsgeräte ebenfalls Einsparpotenziale. Diese fallen entsprechend der Energieverbrauchstruktur im Vergleich zum Wärmebereich allerdings niedriger aus und liegen überwiegend im Einflussbereich der Gebäudenutzer. Für einen selbstnutzenden Gebäudeeigentümer kann es aber im Sinne einer umfassenden Betrachtung unter Berücksichtigung der Möglichkeiten zur Eigenstromversorgung und den damit verbundenen Wechselwirkungen zum Wärmebereich<sup>5</sup> durchaus sinnvoll sein, auch Handlungsoptionen bei diesen Energieverbrauchern in die Modernisierungsplanung mit einzubeziehen. Für einen Vermieter wäre diese Betrachtungsweise nur relevant, sofern er Haushaltsgeräte (Waschmaschinen, Trockner etc.) im Rahmen der Mietverhältnisse zur Verfügung stellt.

---

<sup>5</sup> Wärmebereitstellung aus Kraft-Wärme-Kopplungsanlagen, elektrische Energie für Prozesse der Wärmeversorgung etc.

## 2.2 Struktur und energetischer Status Quo des deutschen Wohngebäudebestands

Neben dem spezifischen Verhalten der Gebäudenutzer bei der Energieanwendung wird der Endenergieverbrauch eines Gebäudes maßgeblich durch seine Geometrie, Größe, Konstruktion und technische Ausstattung sowie durch seine Lage und die Umfeldbedingungen vor Ort (Bebauung der Nachbargrundstücke, Verschattungen etc.) bestimmt. Dementsprechend werden für neu zu errichtende Gebäude von staatlicher Seite hohe Anforderungen an einzelne energierelevante Gestaltungsoptionen des Gebäudes gestellt, um den Energieverbrauch zu beschränken. Die jährliche Neubauroate bezogen auf den jeweiligen Vorjahresbestand an Wohngebäuden betrug für den Zeitraum 2002 bis 2014 im Mittel ca. 0,7 % mit fallender Tendenz. Im selben Zeitraum war ein Abgang von Wohngebäuden (Rückbau, Umnutzung etc.) im Mittel von 0,05 % des Vorjahresbestandes zu verzeichnen [247]. Dies verdeutlicht, dass der wesentliche Beitrag des Wohngebäudebereichs zur Erreichung der energie- und klimapolitischen Zielsetzungen durch die energetische Modernisierung der Bestandsgebäude geleistet werden muss.

Der deutsche Gebäudebestand umfasst mehr als 18 Mio. Wohngebäude<sup>6</sup> mit insgesamt rund 39 Mio. Wohneinheiten (Stand 2011 [24]). Für eine Einschätzung des energetischen Status Quo des Wohngebäudebestandes ist zunächst die Kenntnis seiner Struktur hinsichtlich energierelevanter Merkmale erforderlich. Einen solchen Überblick gibt die Gebäudetypologie des *INSTITUTS WOHNEN UND UMWELT* (siehe Tabelle 1). Da die Gebäude in Abhängigkeit ihres Alters verschiedene charakteristische Konstruktionen, Baustoffe und Bauteilflächen (bspw. Fenstergrößen) aufweisen, die zum Zeitpunkt ihres Neubaus allgemein üblich waren bzw. den damals geltenden Bauvorschriften entsprachen, wird in der Typologie die Baualterklasse als ein wesentliches Gliederungskriterium berücksichtigt. Weitere Gliederungskriterien sind die Größe und die Anbausituation der Gebäude [148].

Den Großteil des Wohngebäudebestands (ca. 64 %) bilden klassische Einfamilienhäuser (freistehend oder als Doppelhaushälfte bzw. Reihenhaus). Zweifamilienhäuser sind der am zweithäufigsten vorzufindende Gebäudegrößentyp (ca. 17 %). Bei den Mehrfamilienhäusern sind Gebäude mit drei bis sechs Wohneinheiten am stärksten vertreten, welche einen Anteil von ca. 11 % des gesamten Wohngebäudebestands repräsentieren [24].

---

<sup>6</sup> Gebäude (ohne Wohnheime), bei denen mindestens 50% der gesamten Gebäudenutzfläche für Wohnzwecke genutzt werden [24].

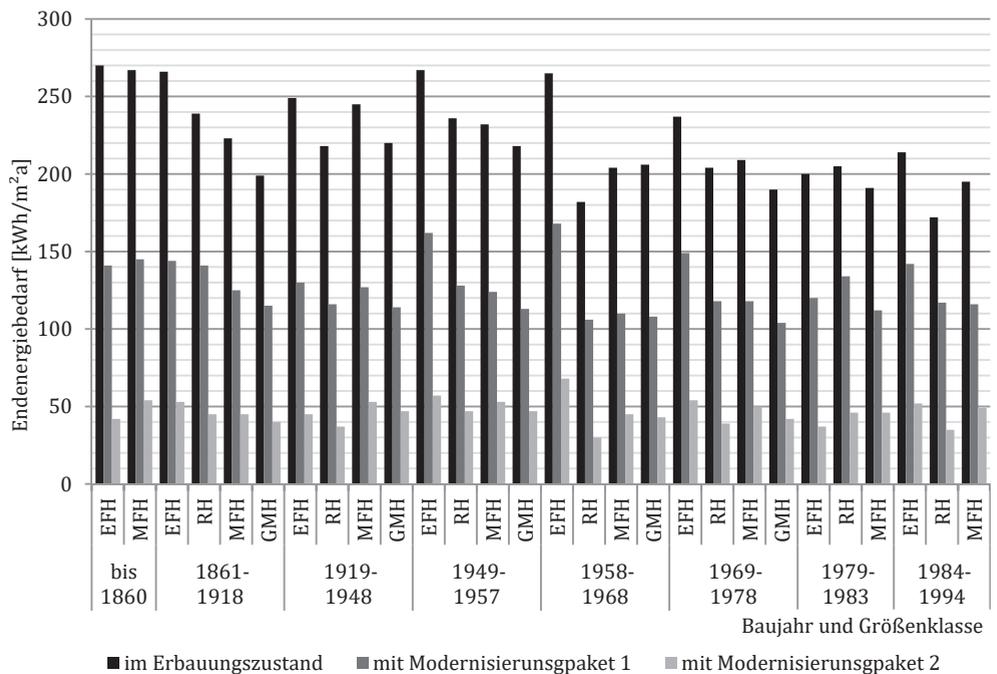
**Tabelle 1:** Alters- und Größenstruktur des deutschen Wohngebäudebestands mit Baujahr bis 2009 (Stand 2011 [75])

Gebäude- klasse	Baujahr/Baualtersklasse										Summe	Anteil	
	bis 1860	1861- 1918	1919- 1948	1949- 1957	1958- 1968	1969- 1978	1979- 1983	1984- 1994	1995- 2001	2002- 2009			
Anzahl Wohngebäude in Tsd.	EFH	330	966	1.131	859	1.509	1.507	704	1.160	1.035	775	9.976	55%
	RH	148	492	710	447	633	611	335	652	619	384	5.030	28%
	MFH	54	442	388	356	586	412	146	309	244	85	3.023	17%
	GMH	1	29	7	17	34	50	15	29	21	8	210	1%
	Summe	533	1.929	2.236	1.679	2.762	2.580	1.200	2.150	1.919	1.251	18.239	
	Anteil	3%	11%	12%	9%	15%	14%	7%	12%	11%	7%		
Anzahl Wohneinheiten in Tsd.	EFH	399	1.213	1.389	1.060	1.948	1.915	881	1.397	1.204	858	12.263	31%
	RH	181	617	840	546	749	685	374	722	674	409	5.796	15%
	MFH	214	2.177	1.911	2.003	3.348	2.313	852	1.826	1.390	461	16.495	42%
	GMH	11	526	126	308	818	1.366	356	605	408	151	4.674	12%
	Summe	806	4.533	4.265	3.915	6.863	6.279	2.463	4.550	3.675	1.880	39.228	
	Anteil	2%	12%	11%	10%	17%	16%	6%	12%	9%	5%		
Wohnfläche in Mio. m <sup>2</sup>	EFH	46	135	150	116	218	233	110	178	158	119	1.463	41%
	RH	19	62	82	52	76	79	45	85	80	52	633	18%
	MFH	16	163	129	125	225	169	64	133	104	39	1.168	33%
	GMH	1	36	8	17	47	87	22	35	26	10	288	8%
	Summe	82	396	370	309	567	569	240	431	368	220	3.552	
	Anteil	2%	11%	10%	9%	16%	16%	7%	12%	10%	6%		
EFH:	Freistehende Gebäude mit 1 bis 2 Wohneinheiten (insbesondere Einfamilienhäuser)												
RH:	Doppel-/Reihenhäuser und sonstige Gebäudetypen mit 1 bis 2 Wohneinheiten												
MFH:	Mehrfamilienhäuser mit 3 bis 12 Wohneinheiten												
GMH:	Große Mehrfamilienhäuser mit mehr als 12 Wohneinheiten												

Für jede Gebäudeklasse werden in der Typologie charakteristische Merkmale (u. a. die beheizte Wohnfläche, Bauteilflächen und deren Beschaffenheit, Fensterarten) eines Neubaus in der jeweiligen Baualtersklasse ausgewiesen.<sup>7</sup> Auf dieser Grundlage können repräsentative Energiekennwerte für ein Gebäude in der jeweiligen Kategorie im Erbauungszustand und das Energiesparpotenzial durch die Umsetzung einer energetischen Modernisierung abgeschätzt werden [148].

<sup>7</sup> Für fast alle Baualtersklassen bis 1994 wird jedoch eine Isolierverglasung für die Fenster unterstellt [75].

Eine solche Gegenüberstellung zeigt Abbildung 2. Dargestellt ist der wohnflächen-spezifische Endenergiebedarf für Raumwärme und Warmwasser für ein typisches Wohngebäude in der jeweiligen Größen- und Baualtersklasse im weitgehend nicht modernisierten Erbauungszustand. Hinsichtlich der vorhandenen Wärmeversor-gungstechnik wurden ebenfalls charakteristische Systeme für die einzelnen Gebäude-kategorien auf Grundlage einer repräsentativen Stichprobenerhebung definiert [77/180]. Zum Vergleich wird der entsprechende Endenergiebedarf ausgewiesen, der durch die Umsetzung von zwei verschiedenen Bündeln von Modernisierungsmaß-nahmen realisiert werden könnte. Modernisierungspaket 1 beinhaltet derzeit gängige Maßnahmen (Stand 2014) und orientiert sich an den energetischen Mindestanfor-derungen von staatlicher Seite. Mit diesem Maßnahmenbündel könnte der Endenergie-bebedarf der Beispielgebäude in den einzelnen Kategorien um 30-45 % gegenüber dem Erbauungszustand gesenkt werden. Modernisierungspaket 2 beinhaltet dagegen am-bitionierte Maßnahmen zum Wärmeschutz und die verstärkte Nutzung Erneuerbarer Energien zur Wärmebereitstellung. Damit ließe sich der Endenergiebedarf der Bei-spielgebäude im Mittel um 80 % gegenüber dem Erbauungszustand reduzieren.



**Abbildung 2:** Typischer wohnflächen-spezifischer Endenergiebedarf für Raumwärme und Warmwasser (Referenzklima Deutschland) für Wohngebäude in verschiedenen Größen- und Baualtersklassen im Erbauungszustand und nach der Umsetzung von Modernisierungsmaßnahmen (Stand 2014 [180 S. 41])

Die tatsächlich erreichbare Endenergiebedarfsreduktion für ein reales noch nicht energetisch modernisiertes Gebäude innerhalb der Kategorien kann aufgrund der Vielzahl der spezifischen Einflussfaktoren (bspw. der Anteil von verglasten Flächen und deren Ausrichtung oder Anforderungen des Denkmalschutzes) von der in Abbildung 2 dargestellten Reduktion für die charakteristischen Beispielgebäude abweichen. Dennoch liefert diese Betrachtung ein Indiz für das dem Wohngebäudebereich zugesprochene technische Potenzial zur Senkung des Energieverbrauchs bzw. zum Einsatz Erneuerbarer Energien.

Betrachtet man die beim Neubau bzw. nachträglich umgesetzten Wärmeschutzmaßnahmen und den Einsatz Erneuerbarer Energie-Technologien im Wohngebäudebestand wird deutlich, dass diese Potenziale erst teilweise genutzt werden. So wurden bis Ende 2009 an ca. 29 % der oberen thermischen Gebäudeabschlussflächen, 64 % der Außenwandflächen und 66 % der Kellerdecken noch keine speziellen Wärmeschutzmaßnahmen vorgenommen [77 S. 44]. Darüber hinaus ist bei den bislang umgesetzten Wärmeschutzmaßen an opaken Flächen eine recht große Bandbreite zwischen relativ geringem und sehr hohem Wärmeschutzstandard vorzufinden. Im Bereich der Fenster weisen erst ca. 56 % der Gebäude einen mittleren bis sehr hohen Wärmeschutzstandard auf [77 S. 77 ff.]. Anlagen zur Wärmebereitstellung mit Nutzung regenerativer Energiequellen kamen bis Ende 2009 erst in weniger als 17 % der Wohngebäude zum Einsatz [54 S. 14/77].<sup>8</sup>

Ein Blick auf die Modernisierungsaktivitäten der Jahre 2000 bis 2008 zeigt, dass die bestehenden Potenziale auch nur langsam ausgeschöpft werden. Pro Jahr betrug der Anteil der Bauteilflächen, deren Wärmeschutz in diesem Zeitraum erhöht wurde, bei Dächern bzw. obersten Geschossdecken im Mittel 1,6 % (2,0 %), bei Außenwänden 0,9 % (1,2 %), bei Kellerdecken 0,4 % (0,5 %) und bei Fenstern 1,3 % (1,8 %). Hieraus ergibt sich eine gewichtete jährliche Gesamt-Modernisierungsrate für Wärmeschutzmaßnahmen an der thermischen Gebäudehülle von rund 0,8 % (1,1 %) [77 S. 69 ff.].<sup>9</sup> Im Bereich der Versorgungsanlagen konnte eine mittlere jährliche Erneuerungsrate der Hauptwärmeerzeuger von rund 2,8 % (3,1 %) ermittelt werden [77 S. 89 ff.]. Die Werte in Klammern weisen die entsprechenden Raten bei Einschränkung der Betrachtung auf Gebäude mit Baujahr vor 1978 aus.

Eine 2013 veröffentlichte Studie des *FRAUNHOFER-INSTITUTS FÜR BAUPHYSIK* zeigt, dass mit einer Fortschreibung der aktuellen Trends bei der Wohngebäudemodernisierung bis 2050 eine Minderung des Primärenergiebedarfs von 64 % realisiert werden könnte [143]. Das gesteckte Minderungsziel von 80 % für den gesamten Gebäudebestand

---

<sup>8</sup> Ohne Betrachtung ergänzender Ofen-/Kaminheizungen.

<sup>9</sup> Gewichtung: Dach/oberste Decke 25 %, Außenwand 50 %, Kellerdecke 12 %, Fenster 13 % [77 S. 73].

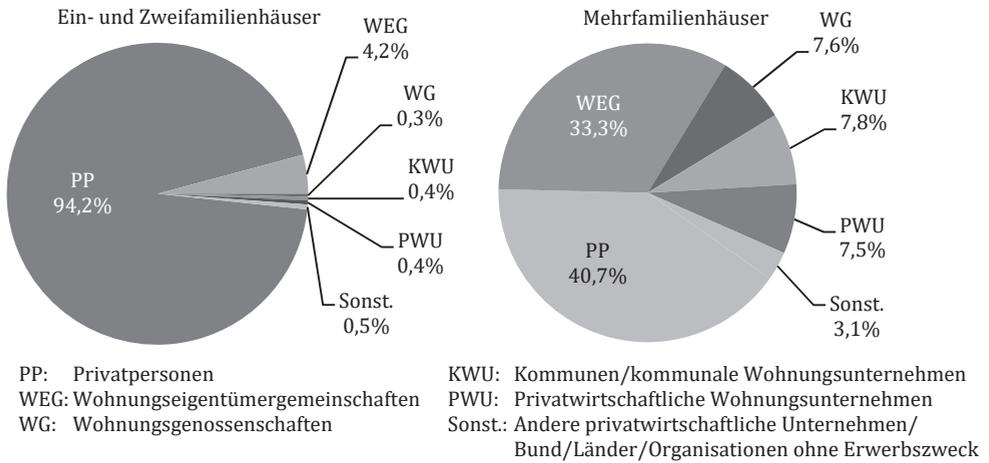
würde somit für den Wohngebäudebereich verfehlt. Um die Zielsetzung zu erreichen ist eine deutliche Steigerung der Modernisierungsraten erforderlich – bspw. für den Bereich der Wärmeschutzmaßnahmen an der thermischen Gebäudehülle mindestens eine Verdopplung [42/78/143]. Letzteres wurde bereits im Energiekonzept 2010 als Zielvorgabe formuliert [44<sup>s.5</sup>/76].

Sofern von staatlicher Seite keine Zwangsmaßnahmen vorgegeben werden, liegt die Entscheidung zur Umsetzung von Modernisierungsmaßnahmen allerdings allein beim Gebäudeeigentümer. Vor diesem Hintergrund werden im nächsten Unterkapitel wesentliche Motive und Hemmnisse für eine energetische Wohngebäudemodernisierung aus Eigentümersicht kurz beleuchtet.

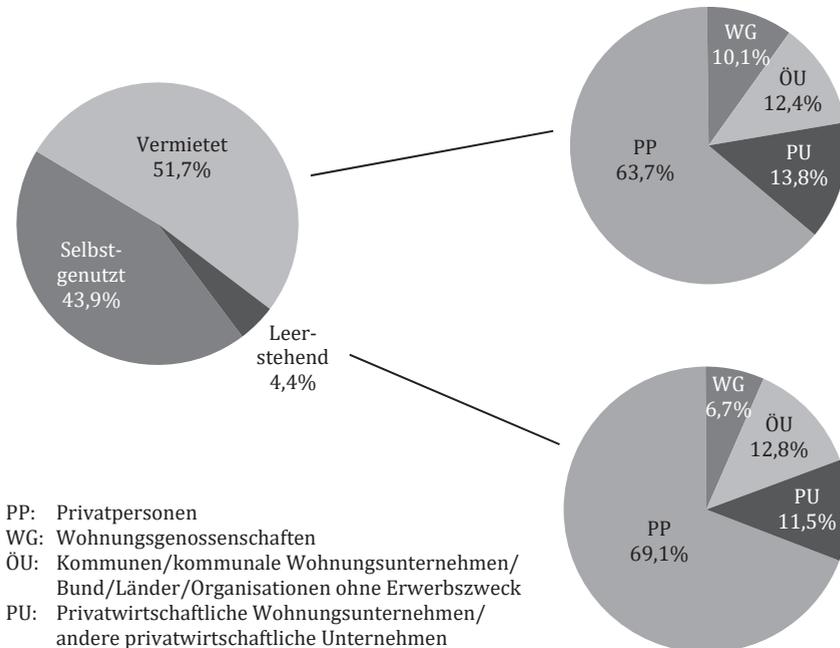
### **2.3 Struktur der Wohngebäudeeigentümer und ihre Modernisierungsmotive und -hemmnisse**

Die Entscheidung eines Eigentümers zur energetischen Modernisierung seines Gebäudes wird oftmals durch mehrere Handlungsmotive gleichzeitig bestimmt. Dabei kann die Relevanz einzelner Handlungsmotive von Eigentümer zu Eigentümer durchaus stark variieren. *STIEß* [249] stellt hierzu eine Studie vor, in der die Wichtigkeit einzelner Motive für verschiedene Entscheidertypen innerhalb einer Gruppe von selbstnutzenden Eigentümern untersucht werden. Auf eine derart differenzierte Betrachtung wird im Folgenden verzichtet. Aufgezeigt werden jedoch charakteristische Handlungsmotive und -hemmnisse sowie deren Relevanz für die beiden Entscheidergruppen „Eigennutzer“ und „Vermieter“, da die Motive dieser Akteure aufgrund der unterschiedlichen Eigentümer-Nutzer-Beziehung in der Regel deutlich voneinander abweichen. Die Betrachtung beschränkt sich dabei auf Eigentümer in Form natürlicher Personen (Privatpersonen), deren Modernisierungsentscheidung im Fokus der vorliegenden Arbeit steht. Um die Bedeutung dieser Akteure – sowohl in der Eigennutzerrolle als auch in der Vermieterrolle – für die energetische Modernisierung hervorzuheben, wird zunächst die Eigentümerstruktur im Wohngebäudebestand dargestellt.

Abbildung 3 zeigt die Gebäudeeigentumsverhältnisse im deutschen Wohngebäudebestand. Erwartungsgemäß dominieren im Ein- und Zweifamilienhausbereich Privatpersonen als Eigentümer, da hier überwiegend Eigennutzer vorzufinden sind. Aber auch im Bereich der Mehrfamilienhäuser bilden sie die größte Eigentümergruppe, gefolgt von Wohnungseigentümergeinschaften. In Summe befinden sich knapp 85 % der Wohngebäude im Eigentum von Privatpersonen (Einzelpersonen, Ehepaare, Erbengemeinschaften etc.).



**Abbildung 3:** Eigentümerstruktur der Gebäude im Wohngebäudebestand (ohne Wohnheime – Stand 2011 [24])



**Abbildung 4:** Nutzungs- und Eigentümerstruktur der Wohneinheiten im Wohngebäudebestand (ohne Wohnheim-, Freizeit- und Ferienwohnungen – Stand 2011 [24])

Die in Abbildung 4 dargestellte Nutzungs- und Eigentümerstruktur der einzelnen Wohneinheiten im Gebäudebestand zeigt, dass mit knapp 52 % der überwiegende Anteil der Wohneinheiten vermietet wird. Selbstnutzende Eigentümer bewohnen lediglich 44 % aller Wohneinheiten. Da Privatpersonen auch in den Wohnungseigentümergeinschaften dominant vertreten sind, befinden sich rund 80 % des gesamten Wohnungsbestandes in Wohngebäuden im Eigentum dieser Akteure [24].

Die fünf wichtigsten Handlungsmotive und -hemmnisse für eine energetische Gebäudemodernisierung bei selbstnutzenden Eigentümern und Vermietern, die in verschiedenen Studien ermittelt wurden, sind in Tabelle 2 aufgelistet.

**Tabelle 2:** Handlungsmotive und -hemmnisse für eine energetische Wohngebäudemodernisierung aus Eigentümersicht (die Reihenfolge entspricht der beigemessenen Bedeutung)

<b>Handlungsmotive</b>	
<b>Selbstnutzer</b> (vgl. [248/254])	<b>Vermieter</b> (vgl. [233/248/254])
Lohnende Investitionen für geringere Energiekosten	Substanzerhaltung der Objekte / Schlechter allgemeiner Gebäude- und Wohnungszustand
Unabhängigkeit von Energiepreisen	Steigerung der Wohnqualität / Schlechte Vermietbarkeit durch hohe Energiekosten
Leisten eines Beitrags zum Umweltschutz	Leisten eines Beitrags zum Umweltschutz
Substanzerhaltung der Objekte	Lohnende Investitionen für geringere Energiekosten / Höhere Mieteinnahmeerwartung
Steigerung der Wohnqualität	Steigerung des Verkaufswerts / der Mieten
<b>Handlungshemmnisse</b>	
<b>Selbstnutzer</b> (vgl. [248/249])	<b>Vermieter</b> (vgl. [233/248])
Mangelnde Bereitschaft zur Kreditaufnahme	Guter Zustand der Gebäude
Einstellung, dass das Haus in einem energetisch guten Zustand ist	Keine Hemmnisse – Investitionen werden dennoch unterlassen
Kein Interesse an über das Notwendige Hinausgehende	Keine Möglichkeit zur Refinanzierung wegen zu niedrigem Mietpreisniveau
Unklarheit über Wirtschaftlichkeit energetischer Modernisierungen	Fehlendes Eigenkapital
Keine Zeit, sich damit zu beschäftigen	Haltung der Mieter zu größeren Baumaßnahmen

Die Übersicht zeigt, dass ökonomische Motive und Hemmnisse vor allem auf der Selbstnutzenseite einen hohen Stellenwert einnehmen. Dies spiegelt die Tatsache wider, dass der Selbstnutzer von der mit Modernisierungsmaßnahmen erreichbaren Energiekostenreduktion profitiert. Gleichzeitig wirkt sich die Unsicherheit über die Wirtschaftlichkeit der Modernisierungsmaßnahmen und fehlendes Eigenkapital in Verbindung mit mangelnder Bereitschaft zur Kreditaufnahme hemmend aus.

Auf der Vermieterseite stehen dagegen zunächst technische Aspekte im Vordergrund. Auslöser von Investitionen in die Gebäudemodernisierung sind damit vorrangig anstehende Instandsetzungsarbeiten zum Erhalt der Bausubstanz. Die Steigerung der Wohnqualität zur besseren Vermietbarkeit stellt allerdings ebenfalls einen wichtigen Beweggrund dar. Niedrige Mietpreisniveaus bzw. fehlende Möglichkeiten, die Modernisierungsinvestition bei der Mietpreisbildung zu berücksichtigen, wirken sich hemmend aus, da ein Vermieter nur über diesen Weg einen monetären Nutzen aus einer energetischen Modernisierung ziehen kann.

Zusammenfassend ist festzustellen, dass der Wohngebäudebereich einen wesentlichen Beitrag zur Energiewende in Deutschland leisten kann. Mit den bestehenden technischen Möglichkeiten zur Energiebedarfsreduktion und zur Nutzung regenerativer Energiequellen sind die in diesem Rahmen für den Gebäudesektor gesteckten Ziele erreichbar. Der Umsetzungsfortschritt der erforderlichen Maßnahmen ist jedoch von der Entscheidung der Eigentümer zur Modernisierung ihres Gebäudes abhängig. Diese Entscheidungssituation steht im Mittelpunkt der vorliegenden Arbeit. Im Folgenden wird ein Überblick zu einzelnen technischen Aspekten des Energiesystems „Wohngebäude“ und dessen Modernisierung gegeben.

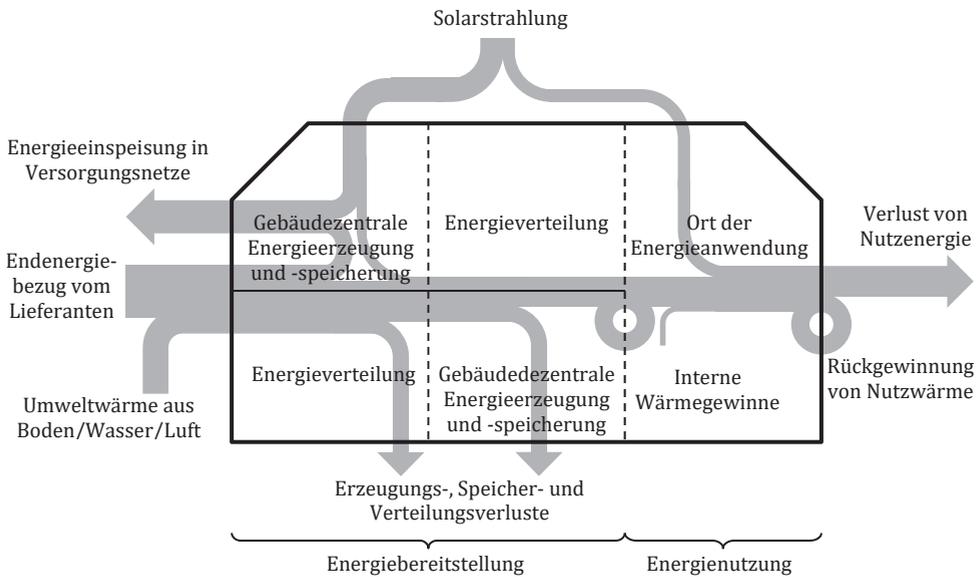
## 2.4 Das Energiesystem „Wohngebäude“

In unserem Kulturkreis stellt der Zugriff auf Energie in Gebäuden eine wichtige Voraussetzung für deren zweckgemäße Nutzbarkeit dar und wird als selbstverständlich erachtet. Bewusst wahrgenommen wird dieser Umstand oftmals erst bei einem Ausfall ihrer Verfügbarkeit. Zur Bereitstellung der benötigten Energie kann einerseits die direkt am Gebäudestandort verfügbare Primärenergie (Solarstrahlung und Umweltwärme aus Luft, Wasser und Boden) genutzt werden. Andererseits besteht die Möglichkeit, Energie in Form von Kohlebriketts, Heizöl, Erdgas, Fernwärme, Strom und Biomasseprodukten von einem Lieferanten zu beziehen. Diese Energie wird anderorts aus erschöpflichen (Lagerstätten von Erdöl, Erdgas, Braun- und Steinkohle etc.) sowie regenerativen Primärenergiequellen (Sonne, Wind, Wasser, Boden, Biomasse) gewonnen. Die Primärenergie aus diesen Quellen durchläuft mit Verlusten bzw. Verbrauch<sup>10</sup> verbundene Transport-, Veredelungs- und Umwandlungsprozesse auf den vorgelagerten Stufen des Energieversorgungssystems, bis sie letztendlich in der benötigten Form als Endenergie an der Gebäudegrenze bereitsteht.

---

<sup>10</sup> Umwandlung nutzbarer Energie in minderwertige Energie, welche für den vorgesehenen Zweck nicht mehr nutzbar ist [221 S. 40].

Innerhalb seiner Grenzen weist ein Gebäude selbst die Struktur eines Energiesystems mit den entsprechenden Wechselwirkungen zwischen den Bereichen Energieerzeugung<sup>11</sup>, -verteilung und -nachfrage auf. Dem Gebäudeeigentümer bieten sich in diesem Rahmen verschiedene Handlungsoptionen zur effizienten Bereitstellung und effektiven Nutzung von Energie sowie zum Einsatz von Erneuerbare Energie-Technologien und Energiespeichern. Abgesehen vom wesentlich kleineren Maßstab sieht er sich bei der wirtschaftlichen Auslegung des Gebäudeenergiesystems somit Herausforderungen gegenübergestellt, die im Grundsatz sehr ähnlich zu denen bei der Gestaltung übergeordneter Energieversorgungsstrukturen sind [184].



**Abbildung 5:** Schematische Darstellung des Wohngebäudeenergiesystems

Die gebäudeinterne Energiebereitstellungskette ist in Abbildung 5 dargestellt. Die über die Gebäudegrenze bezogene Endenergie wird dabei weiteren Umwandlungs-, Speicher- und Transportprozessen unterworfen, um letztendlich die benötigte Nutzenergie für die nachgefragten Energieanwendungen zu erzeugen und am jeweiligen Anwendungsort zum richtigen Zeitpunkt bereitzustellen. Hierbei kann grob zwischen gebäudezentraler (bspw. im Hausanschlussraum) und gebäudefezentraler Energieerzeugung (in den Wohneinheiten) unterschieden werden. Die verfügbare Energie aus regenerativen Quellen am Gebäudestandort ist zum Teil passiv nutzbar (natürliches

<sup>11</sup> Erzeugung der benötigten Energieformen/-träger aus den verfügbaren Energieformen/-trägern durch Umwandlungsprozesse.

Licht und Wärmestrahlung) oder kann durch Energie- und Technologieeinsatz aktiv nutzbar gemacht werden. Im Fall der objektinternen Stromerzeugung besteht die Möglichkeit, elektrische Energie ins Versorgungsnetz einzuspeisen.

Auch die gebäudeinternen Umwandlungs-, Speicher- und Transportprozesse gehen mit Energieverlusten einher und benötigen zusätzlich Hilfsenergie zum Antrieb und zur Steuerung der technischen Anlagen. Die Bereitstellungsverluste einer Energieanwendung können aber teilweise einer anderen Anwendung zugutekommen. Hierbei handelt es sich um interne Wärmegewinne, welche durch die Wärmeabgabe der gebäudenutzenden Personen und der Abwärme von einzelnen Energieanwendungen ergänzt werden. Letztendlich wird aber die gesamte Nutzenergie im Rahmen der Energieanwendungen verbraucht bzw. sie entweicht über die Gebäudegrenze und geht an die Umgebung verloren [170 S.23]. Ein Teil der entweichenden Nutzwärme kann jedoch wiederum durch Technologie- und Energieeinsatz temporär zurückgewonnen werden.

Aufbauend auf dieser recht allgemeinen Betrachtung des Gebäudeenergiesystems wird in den folgenden Abschnitten ein kurzer Überblick zu wesentlichen Zusammenhängen und technischen Handlungsoptionen auf der Energiebereitstellungs- und Nutzungsseite gegeben, welche den Gebäudeendenergieverbrauch bzw. -bedarf beeinflussen.<sup>12</sup>

### **2.4.1 Heizwärmebedarf in Wohngebäuden und Maßnahmen zu dessen Reduktion**

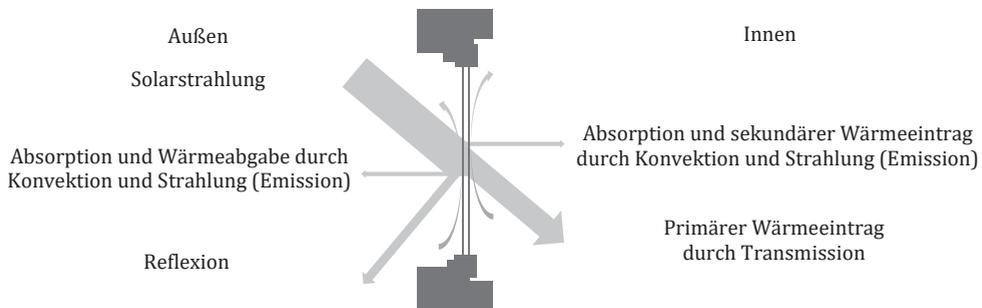
Die Heizwärmeversorgung in einem Gebäude dient zur Gewährleistung der thermischen Behaglichkeit der Nutzer während der kalten Jahreszeit und stellt – wie im Unterkapitel 2.1 S.8 gezeigt – die anteilmäßig größte Energieanwendung in deutschen Wohngebäuden dar. Das thermische Behaglichkeitsempfinden der Nutzer wird von verschiedenen Einflussgrößen bestimmt. Dazu zählt u. a. neben der physischen Belastung und der Bekleidung der Personen vor allem das thermische Raumklima, welches durch die Parameter Lufttemperatur, Strahlungstemperatur der Umgebung, Luftbewegung und -feuchte charakterisiert werden kann.<sup>13</sup>

---

<sup>12</sup> Als Energieverbrauch wird die gemessene Energieinanspruchnahme bezeichnet, die u. a. in Abhängigkeit des herrschenden Wetters und des tatsächlichen Verhaltens der Gebäudenutzer realisiert wird. Der Bedarfsbegriff bezeichnet dagegen eine Norm-Prognose des Energieverbrauchs, bei dessen Berechnung Standardwerte u. a. für typisches Nutzerverhalten und charakteristische Witterungsverläufe in einzelnen Zeiträumen berücksichtigt werden. Der berechnete Energiebedarf und der tatsächlich eintretende Energieverbrauch können deshalb stark voneinander abweichen (vgl. bspw. [180 S.76 ff.]).

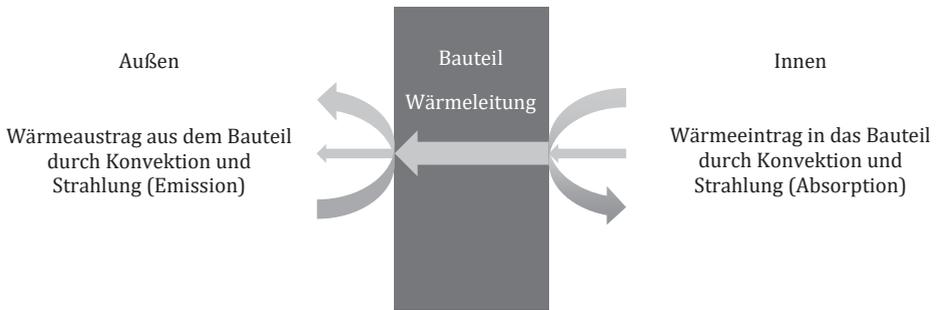
<sup>13</sup> Vgl. hierzu und weiterführend [115/146 S.21 ff./170 S.26 ff.] sowie [DIN EN ISO 7730].

Der Heizwärmebedarf repräsentiert die errechnete Menge an Nutzwärme, welche zur Aufrechterhaltung eines behaglichen thermischen Raumklimas durch das Heizsystem in die Gebäudezonen einzutragen ist. Die Ermittlung erfolgt auf Grundlage einer Bilanzierung der Gewinne aus Wärmequellen und der Verluste durch Wärmesenken für einen bestimmten Zeitraum. Wärmegewinne ergeben sich durch die Wärmeabgabe der Gebäudenutzer, der Beleuchtung und der elektrischen Geräte sowie die Wärmeverluste angrenzender Bereiche und der Warmwasserverteilung. Diese Wärmegewinne verringern den Heizwärmebedarf einer Gebäudezone. Ebenso reduzierend wirken sich solare Energiegewinne insbesondere durch die transparenten Flächen der Gebäudehülle aus. Letztere setzen sich aus der direkt transmittierten Strahlung sowie der absorbierten und durch Konvektion und Strahlung an die Räume abgegebene Wärme zusammen (siehe Abbildung 6). Der Anteil der Solarenergie, der durch diese beiden Vorgänge ins Gebäudeinnere gelangen kann, ist von der Gestaltung der transparenten Flächen abhängig und wird durch ihren Gesamtenergiedurchlassgrad (g-Wert) ausgedrückt. Neben dem g-Wert wird der solare Energieeintrag auch von der Flächenausrichtung und -verschattung beeinflusst.



**Abbildung 6:** Schematische Darstellung des Solarwärmegewinns durch ein Fenster

Eine wesentliche, den Heizwärmebedarf steigernde Wärmesenke stellen die Transmissionswärmeverluste über die Hüllfläche einer Gebäudezone dar. Diese Verluste resultieren aus der Wärmeübertragung durch die einzelnen Bauteile, welche aufgrund von Temperaturunterschieden auf ihrer Innen- und Außenseite sowie ihrer Wärmeleitfähigkeit entsteht (siehe Abbildung 7). Die Wärmeübertragung zwischen Hüllfläche und Umgebung erfolgt wiederum durch Strahlung und Konvektion.



**Abbildung 7:** Schematische Darstellung des Wärmeverlustes durch ein opakes Außenbauteil

Der Wärmedurchgang unter stationären Randbedingungen bei einer Temperaturdifferenz von 1 K durch ein ebenes Bauteil mit homogenen Schichten und einer Fläche von 1 m<sup>2</sup> wird durch den Wärmedurchgangskoeffizienten (U-Wert) charakterisiert. Der U-Wert ist abhängig von den Wärmeübergangswiderständen an den Bauteiloberseiten sowie der Dicke und Wärmeleitfähigkeit der einzelnen Bauteilschichten. Auch wenn stationäre Randbedingungen durch ständige Temperaturschwankungen etc. in der Realität nicht gegeben sind, wird der U-Wert als geeignete Größe angesehen, um mittlere Wärmedurchgänge durch Bauteile für durchschnittliche Temperaturdifferenzen in längerfristigen Bilanzierungszeiträumen zu bestimmen [270 S. 133]. Auf dieser Grundlage werden letztendlich die Norm-Transmissionswärmeverluste einer Gebäudezone errechnet.

Zur Verringerung der Transmissionswärmeverluste über opake Bauteile kommen verschiedene Materialien mit geringer Wärmeleitfähigkeit (Wärmedämmstoffe vorrangig im Bereich von 0,02 bis 0,045 W/mK) in Form von Platten, Schüttungen und Matten bzw. Filzen zum Einsatz (siehe Tabelle 3).

**Tabelle 3:** Übersicht zu Dämmstoffen [244]

anorganisch	synthetisch	Mineralwolle (Glas/Stein), Schaum-/Blähglas, Kalziumsilikatschaum, Aerogel, Gips-schaum, Keramikfasern/-schaum, Pyrogene Kieselsäure, Schlackenwolle
	natürlich	(Bläh-)Perlite, Vermiculite (Blähglimmer), Blähton, Bims, Wärmedämmziegel
organisch	synthetisch	Styropor/Polystyrolschaum, Polyurethanschäume, Resol-/Phenolharzschaum, Melamin-harzschaum, Polyethylenschaum, Harnstoff-Formaldehydharzschaum, Polyesterfasern
	natürlich	Holzwohle/-fasern/-späne, Kork, Zellulosefasern, Hanf, Flachs, Schilf, Stroh, Seegras, Torf, Kokosfasern, Schaf-/Baumwolle, Getreidegranulat

Am häufigsten finden Mineralwolle, Styropor/Polystyrolschaum und Polyurethanschäume Verwendung (Stand 2013 [244<sup>S. 74</sup>]). Innovative Weiterentwicklungen wurden in den letzten Jahren durch Materialkombinationen (bspw. Aerowolle – Steinwolle und Aerogel) sowie im Bereich der Vakuumdämmungen (bspw. Isolationspaneele mit pyrogener Kieselsäure als Stützkern) erreicht. Letztere weisen Wärmeleitfähigkeiten unter 0,01 W/mK auf [128<sup>S. 39</sup>/244<sup>S. 50</sup>].

Eine besondere Schwachstelle hinsichtlich der Transmissionswärmeverluste stellen material- und konstruktionsbedingt die transparenten Hüllflächen dar. Seit 1995 sind im Fensterbereich zweifache, seit 2005 dreifache Wärmeschutzverglasungen mit Metalloxidschichten auf den Gläsern und Edelgasfüllungen (Argon, Krypton, seltener Xenon) in den Zwischenräumen Stand der Technik, welche die Wärmeverluste durch das Bauteil reduzieren. Je nach Aufbau und Beschichtung werden U-Werte zwischen 0,5 und 1,1 W/m<sup>2</sup>K für die Verglasung erreicht.<sup>14</sup> Tendenziell fällt bei kleineren U-Werten auch der g-Wert niedriger aus, sodass die solaren Strahlungsgewinne ebenfalls abnehmen [269].

Die zweite wesentliche Heizwärmesenke stellen die Lüftungswärmeverluste dar. Die Raumlüftung dient einerseits zur Regulierung der Raumluftheuchte und andererseits zur Sicherstellung der Raumlufthequalität hinsichtlich chemischer Behaglichkeitskomponenten wie bspw. CO<sub>2</sub>-Gehalt und Gerüche [146<sup>S. 13 f.</sup>]. In Bestandswohngebäuden ist die freie Lüftung durch Fensteröffnung und Fugen vorherrschend [77<sup>S. 99</sup>]. Letztere sind aufgrund der völligen Unkontrollierbarkeit der damit verbundenen Wärmeverluste möglichst zu vermeiden. Wird der Luftaustausch dagegen durch eine Lüftungsanlage sichergestellt, bietet sich die Möglichkeit zur Erwärmung der Zuluft durch die Abluft (Wärmerückgewinnung – WRG). Je nach System können damit 75 bis über 90 % der Abluftwärme nutzbar gemacht werden. In zentralen Wohngebäudelüftungsanlagen kommen u. a. direkte rekuperative (Platten- und Röhrenwärmeübertrager) und regenerative WRG-Systeme mit rotierenden Speichermassen zum Einsatz.<sup>15</sup> Die Nachrüstung einer zentralen Anlage kann aufgrund der erforderlichen Lüftungskanäle jedoch problematisch sein. Alternativ bietet sich der Einbau dezentraler Lüfter mit WRG in die Raumaußenwände an (bspw. Umschaltregeneratoren mit feststehender Speichermasse).

---

<sup>14</sup> Der U-Wert für das gesamte Fenster (Verglasung, Rahmenverbund und Rahmen) liegt in der Regel 0,2-0,5 W/m<sup>2</sup>K darüber.

<sup>15</sup> Vgl. hierzu und weiterführend [145<sup>S. 359 ff.</sup>/146<sup>S. 392 ff.</sup>].

## 2.4.2 Energieerzeugung in Wohngebäuden

Zur Energieerzeugungsseite in Gebäuden können alle technischen Anlagen bzw. Geräte gezählt werden, welche aus den an der Gebäudegrenze verfügbaren Energieformen/-trägern durch Umwandlung bzw. Übertragung letztendlich die erforderliche Nutzenergie gewinnen. Im Folgenden wird ein kurzer Überblick über die Technologien zur Erzeugung von Wärme und Strom in Wohngebäuden als die wichtigsten Energieformen in diesen Energiesystemen gegeben.

### 2.4.2.1 Heizkessel

In ca. 87 % der Wohngebäude kommen Heizkessel als Wärmeerzeuger zum Einsatz (Stand 2009 [77 S. 82]). Durch Verbrennung von Gas oder Öl, seltener von festen Stoffen<sup>16</sup>, erhitzen sie das Heizwasser in den die Brennkammer umschließenden Kanälen bzw. im darüber angeordneten Kesselwasserbehälter. Sie können sowohl gebäudezentral als auch dezentral (Etagen- bzw. wohnungszentrale Anlagen) installiert sein. Konstanttemperaturheizkessel werden ganzjährig mit einer Temperatur über 60 °C betrieben. Es handelt sich um eine veraltete Technologie, die aber in Bestandsgebäuden noch vorzufinden ist (ca. 16 % der vorhandenen Anlagen [77 S. 97]). Nachteilig wirken sich hier vor allem die hohen Bereitschaftswärmeverluste aus. Als Niedertemperaturheizkessel werden dagegen Anlagen bezeichnet, die dauerhaft bzw. gleitend auch deutlich unterhalb von 60 °C betrieben werden können und sich dadurch besser an den saisonal schwankenden Wärmebedarf anpassen lassen. Beide Kesseltypen nutzen lediglich den Heizwert der eingesetzten Energieträger. Stand der Technik sind jedoch Kessel mit Brennwertnutzung (Brennwertkessel). Diese Anlagen verfügen zusätzlich über einen Wärmetauscher, in dem die latente Wärmeenergie des in den Abgasen enthaltenen Wasserdampfs durch Kondensation entweder der Brennerzuluft oder direkt dem Heizwasser am Rücklauf zugeführt wird. Im letzteren Fall müssen die Rücklauftemperaturen des Heizungssystems allerdings unterhalb der brennstoffabhängigen Taupunkttemperaturen (für Gas ca. 58 °C, Öl ca. 48 °C) liegen [110 S. 856]. Ende 2009 waren Niedertemperatur- und Brennwertkessel im Gebäudebestand etwa gleich stark vertreten. Letztere dominieren jedoch bei den Neuinstallationen [77 S. 98].

### 2.4.2.2 Fern- und Nahwärme

Fern- und Nahwärme wird in ca. 4 % der deutschen Wohngebäude genutzt. Bezogen auf die Wohneinheitenanzahl liegt der Anteil sogar bei 12 % (Stand 2009 [77 S. 82]). Die Anlagentechnik im Gebäude beschränkt sich bei dieser Versorgungsoption auf eine

<sup>16</sup> Gas 59 %, Öl 37 %, Festbrennstoffe 4 % [77 S. 97/289 S. 13].

Wärmeübergabestation mit Wärmetauschern, welche die in der Regel mittels Heißwasser (110-180 °C, 16-25 bar) aus Heiz(kraft)werken und Industrieanlagen über ein Verteilnetz bereitgestellte (Ab-)Wärme dem Gebäude zuführt [173<sup>S. 692</sup>]. Sie ist mit Vorrichtungen zur Druckbegrenzung sowie zur Regelung und Erfassung der Wärmemengen ausgestattet [110<sup>S. 858</sup>].

### 2.4.2.3 Solarthermieranlagen

Solarthermieranlagen zählen zu den Technologien, welche die verfügbare Energie aus regenerativen Quellen am Gebäudestandort aktiv verwertbar machen. In den Kollektoren der Anlagen erhitzt die Sonnenstrahlung ein zirkulierendes Arbeitsmittel (in der Regel ein Wasser-Glykol-Gemisch). Hierfür wird das solare Strahlungsspektrum von 400 bis etwa 2.500 nm ausgenutzt. Neben dem Standort und der Ausrichtung ist der erreichbare Wärmeertrag des Kollektors vom Transmissionsgrad seiner Abdeckung, vom Absorptionsgrad seines Absorbers und von seinen Wärmeverlusten an die Umgebung abhängig [219<sup>S. B 52</sup>]. Unterschieden wird grob zwischen Flach- und Röhrenkollektoren.<sup>17</sup> Erstere kommen am häufigsten zum Einsatz. Röhrenkollektoren sind teurer in der Anschaffung, weisen allerdings eine größere flächenbezogene Leistungsdichte auf und können bei niedrigen Außentemperaturen und ungünstigeren Strahlungsverhältnissen pro Flächeneinheit höhere Wärmeerträge als Flachkollektoren erzielen. Das Arbeitsmittel überträgt die gewonnene Wärme üblicherweise in Wärmespeicher wobei weitere Verluste in Kauf zu nehmen sind. Aufgrund der saisonal schwankenden Energiebereitstellung stellen Solarthermieranlagen eine ergänzende Versorgungstechnologie dar. Ende 2009 wurden sie in rund 9 % der Wohngebäude zur Warmwasserbereitung eingesetzt. Bei gut einem Drittel davon unterstützten die Anlagen auch die Raumwärmebereitstellung [77<sup>S. 96</sup>].

### 2.4.2.4 Wärmepumpen

Die vor Ort verfügbare Umweltwärme aus Boden, (Grund-)Wasser oder Luft kann durch Wärmepumpen nutzbar gemacht werden. Die Funktionsweise der Anlagen beruht auf einem thermodynamischen Kreisprozess, in dem ein Arbeitsmedium mit geringer Siedetemperatur (Kältemittel) kontinuierlich umgewälzt und dabei verdampft, verdichtet, verflüssigt, entspannt und wieder verdampft wird. Dadurch wird dem natürlichen Wärmereservoir mit relativ niedrigen Temperaturen thermische Energie entzogen und mit höherer Temperatur an das Wärmeversorgungssystem des

---

<sup>17</sup> Vgl. weiterführend [99<sup>Kap. 7 S. 36 ff.</sup>].

Gebäudes wieder abgeben.<sup>18</sup> Der Wärmeentzug aus dem Boden erfolgt über tief eingebrachte Sonden (in der Regel < 100 m) oder flach verlegte Kollektoren unterhalb der Frostgrenze. Im Fall der Grundwassernutzung sind Förder- und Schluckbrunnen anzulegen. Für die Verdichtung des Arbeitsmediums ist der Einsatz mechanischer oder thermischer Energie erforderlich. In Abhängigkeit der Temperaturanhebung übersteigt die erzeugte Nutzwärmemenge jedoch die eingesetzte Antriebsenergiemenge um ein Vielfaches, wobei die Anlageneffizienz mit fallender Temperaturdifferenz zunimmt.<sup>19</sup>

Wärmepumpen werden sowohl zur Raumwärme- als auch zur Warmwassererzeugung eingesetzt und können neben den genannten natürlichen Wärmequellen ebenso Wärme aus dem häuslichen Abwasser oder der Raumabluft dafür nutzbar machen. Sie übernehmen die Wärmeversorgung vollständig (monovalenter Betrieb) oder in Kombination mit einem zweiten Wärmeerzeuger (bivalenter Betrieb). Im letzteren Fall fungieren sie üblicherweise als Grundlastherzeuger. Die Verbreitung dieser Anlagen ist noch gering (< 2 % der Wohngebäude). Bei den Neubauten seit 2005 bis 2009 erreichen sie mit knapp 20 % jedoch einen wesentlich höheren Anteil. Vorrangig handelt es sich dabei um elektrische Kompressionswärmepumpen (Stand 2009 [77 S. 82, 85]). Deutlich seltener werden Anlagen mit einem Verbrennungsmotor als Antrieb oder mit thermischem Verdichter (Absorptionswärmepumpen) installiert.<sup>20</sup> Ein weiterer möglicher Einsatzbereich von Wärmepumpen ist die Raumkühlung. Das Funktionsprinzip ist dasselbe wie eben geschildert, nur dass hierbei dem Wohnraum thermische Energie entzogen und an die Umwelt oder spezielle saisonale Wärmespeicher abgegeben wird.<sup>21</sup>

#### 2.4.2.5 Wassererwärmer

Für die Warmwasserbereitung in Wohngebäuden kommen verschiedene Anlagen in Betracht, die sich grob in die drei Kategorien Speicher-Wassererwärmer, Durchlauf-erhitzer und Boiler gliedern lassen. Speicher-Wassererwärmer werden zur gebäudezentralen, in kleinerem Maßstab aber auch zur dezentralen Warmwasserversorgung eingesetzt. Diese Anlagenkategorie wird im Abschnitt 2.4.3 S. 27 zur Energiespeicherung in Gebäuden nochmals aufgegriffen. Mit Anlagen der beiden anderen Kategorien werden üblicherweise nur einzelne Zapfstellen versorgt.

---

<sup>18</sup> Vgl. weiterführend [175 S. 420 ff.].

<sup>19</sup> Zur Übersicht am Markt verfügbarer Wärmepumpen mit Leistungszahlen nach DIN EN 14511 vgl. [19].

<sup>20</sup> Vgl. weiterführend [219 S. H 154 f.].

<sup>21</sup> Vgl. weiterführend [146 S. 85 ff., 445 ff.] sowie Unterabschnitt 2.4.3.1 S. 28.

Boiler verfügen über ein druckloses Wasservolumen ohne Wärmedämmung, welches zeitnah vor der Entnahme erwärmt wird. Durchlauferhitzer erwärmen dagegen direkt das fließende Wasser während der Entnahme und versorgen gegebenenfalls auch eine kleine Anzahl mehrerer Zapfstellen. Als Energieträger werden in der Regel Strom oder Gas genutzt. Einen besonderen, vorrangig wohnungszentral eingesetzten Wärmeerzeugertyp repräsentiert die Kombitherme. Sie stellt neben Warmwasser nach dem Durchlauferhitzerprinzip auch Heizwärme bereit [219 S. B 35 ff.].

#### 2.4.2.6 Kraft-Wärme-Kopplungsanlagen

Zur Stromerzeugung in Wohngebäuden kommen zunächst Technologien mit Kraft-Wärme-Kopplung (KWK) in Betracht. Obwohl ihr Einsatz durch die gleichzeitige Wärmebereitstellung besonders vorteilhaft erscheint, ist die Verbreitung in Wohngebäuden nach wie vor sehr gering (Stand 2009: 0,1 % [14/77 S. 82]). In der Regel werden die Anlagen wärmegeführt betrieben, d. h. ihr zeitlicher Einsatz orientiert sich ausschließlich am Wärmebedarf im Gebäude.<sup>22</sup> Die Wirtschaftlichkeit des Betriebs wird maßgeblich von der Anlagenauslastung und dem objektinternen Nutzungsgrad des erzeugten Stroms beeinflusst. Dabei ist zu berücksichtigen, dass die Nachfrage nach thermischer und elektrischer Energie im Tagesverlauf und vor allem saisonal unterschiedlich stark ausgeprägt ist. Vor diesem Hintergrund werden KWK-Anlagen üblicherweise als Grundlastherzeuger ausgelegt und durch einen zweiten Wärmeerzeuger zur Deckung von thermischen Lastspitzen ergänzt. In den am häufigsten in Wohngebäuden eingesetzten KWK-Anlagen wird ein Stromgenerator durch einen Verbrennungsmotor für Erd- oder Flüssiggas (seltener Biogas oder Heizöl) angetrieben.<sup>23</sup> Die Stromkennzahlen (Verhältnis von elektrischer Leistung zur nutzbaren Wärmeleistung) bewegen sich für die hier gängigen Leistungen bis 50 kW<sub>el</sub> vorrangig zwischen 0,35 und 0,65 [13].

#### 2.4.2.7 Photovoltaikanlagen

Photovoltaikanlagen (PV-Anlagen) kommen zwar wesentlich häufiger als KWK-Anlagen zur objektinternen Stromerzeugung zum Einsatz, allerdings ist auch ihre Verbreitung im Wohngebäudebestand noch gering (Stand 2009: 2,4 % [43/77 S. 96 f.]). Die PV-Technologie beruht auf der direkten Umwandlung der Solarstrahlung in elektrische Energie. Grundlage ist der Photoeffekt in Halbleitern.<sup>24</sup> Dabei werden in Abhängigkeit des verwendeten Halbleitermaterials für die Solarzellen, welche zu Modulen

---

<sup>22</sup> Vgl. hierzu und zu anderen Betriebsstrategien gebäudeintegrierter KWK-Anlagen [238 S. 45 ff.].

<sup>23</sup> Vgl. hierzu und zu weiteren KWK-Technologien (Brennstoffzellen, Stirlingmotor etc.) [255].

<sup>24</sup> Vgl. weiterführend [194 S. 58 ff./275 S. 318 ff.].

zusammengefasst werden, verschiedene Anteile des Sonnenspektrums im Wellenlängenbereich von ca. 300 bis 1.100 nm genutzt [186<sup>s.48</sup>]. Vorrangig kommt kristallines Silizium zum Einsatz [95<sup>s.8</sup>]. Unterschieden wird zwischen poly- und monokristallinen Modulen. Erstere sind in der Regel etwas günstiger in der Anschaffung, ihre Wirkungsgrade liegen mit ca. 12-16 % aber auch unterhalb der Wirkungsgrade von monokristallinen Modulen mit ca. 14-20 %. Dünnschichtmodule bspw. aus amorphem Silizium, Cadmiumtellurid oder Kupfer-Indium-Selenid bilden eine dritte Kategorie. Neben dem niedrigeren Anschaffungspreis weisen sie im Vergleich zu den kristallinen Modulen auch einen kleineren Leistungsabfall bei hohen Temperaturen und vorrangig diffuser Strahlung auf. Nachteilig wirken sich dagegen ihr geringer Wirkungsgrad (ca. 5-10 %) und ihre etwas kürzere Lebensdauer aus [69]. Neben den PV-Modulen ist für den Betrieb einer PV-Anlage ein Wechselrichter zur Wandlung des erzeugten Gleichstroms in Wechselstrom erforderlich.

### 2.4.3 Energiespeicherung in Wohngebäuden

Die Speicherung von Energie ermöglicht die zeitliche Entkopplung ihrer Erzeugung und Nutzung. Diese Option wird in Wohngebäuden unter zwei Gesichtspunkten angewandt. Der erste kommt bei der Warmwasserversorgung zum Tragen und betrifft die Beschränkung der Wärmeerzeugerleistung. Die Zulauftemperatur des Trinkwassers am Hausanschluss schwankt im Jahresverlauf und kann je nach Lage des Versorgungsnetzes zwischen wenigen Grad über null bis über 20 °C betragen [118<sup>s.3 f.</sup>]. Um die erforderlichen Zapftemperaturen von ca. 45 bis 65 °C kurzfristig mittels Boilern oder Durchlauferhitzern bereitzustellen, sind in Abhängigkeit der Entnahmemenge sehr hohe Wärmeerzeugungskapazitäten erforderlich. Durch die Erwärmung und Bevorratung des Warmwassers in Speichern kann die Versorgung dagegen auch in den Stoßzeiten des Bedarfs mit deutlich reduzierten Anlagenleistungen sichergestellt werden.

Der zweite Gesichtspunkt betrifft das Ausnutzungspotenzial der am Gebäudestandort verfügbaren regenerativen Energiequellen mit fluktuierendem Energieangebot aber auch der zeitgleich bereitgestellten Wärme und Elektroenergie im Fall des KWK-Anlageneinsatzes. Hier dient die Energiespeicherung zum Ausgleich voneinander abweichender Intensitäten von Energieangebot und -nachfrage zu einzelnen Zeitpunkten. Im Folgenden wird ein kurzer Überblick zu einzelnen physikalischen und technischen Aspekten der Speicherung von thermischer und elektrischer Energie in Wohngebäuden gegeben.

### 2.4.3.1 Speicher für thermische Energie

Die Warmwasserbereitung in Speichern (Speicher-Wassererwärmer) stellt bei der dezentralen Warmwasserversorgung eine Alternative zu Durchlauferhitzern und Boilern dar. Bei einer gebäudezentralen Warmwasserversorgung ist sie der Regelfall. Zur Verringerung der Wärmeverluste über ihre Hülle sind diese Speicher grundsätzlich gut gedämmt. Das Speicherwasser wird durch das Heizwasser aus dem Heizwärmeerzeuger und/oder durch separate Wärmeerzeuger des Speichers erhitzt. Gegebenenfalls wird zusätzlich die Wärme aus einer Solarthermieanlage genutzt.

Die Kombinationsmöglichkeiten einzelner Wärmeerzeugertechnologien zur Warmwasserbereitung in diesen Speichern sind vielfältig.<sup>25</sup> Je nach Anzahl der eingesetzten Wärmeerzeuger wird zwischen monovalenten und bivalenten – mitunter auch multivalenten – Systemen unterschieden. Bei der monovalenten Betriebsweise erfolgt der Wärmeeintrag im unteren Teil des Speichers, um im gesamten Volumen die erforderliche Wassertemperatur zu erreichen. Bivalente Speicher kommen zum Einsatz, wenn regenerative Energiequellen zur Warmwasserbereitung genutzt werden. In diesem Fall wird die gewonnene Wärme aus der Wärmepumpe oder der Solarthermieanlage im unteren Teil des Speichers eingetragen. Kann die erforderliche Temperatur durch diese Anlagen nicht bereitgestellt werden, übernimmt bspw. ein Heizkessel oder ein elektrischer Heizstab die Nachheizung des Wassers im oberen Speicherbereich. Eine besondere Form stellen Schichtladespeicher dar. In ihnen wird die mit einer bestimmten Temperatur bereitgestellte Wärme aus einer Solarthermieanlage jeweils in die Wasserschicht des Speichers eingetragen, die in etwa dasselbe Temperaturniveau aufweist. Der Vorteil ist u. a. darin zu sehen, dass die Anlage beim Erreichen des erforderlichen Temperaturniveaus auch direkt in die oberen Schichten des Speichers Wärme einspeisen kann und somit gegebenenfalls schon nach kurzer Anlagenaktivität durch Solarenergie erwärmtes Wasser zur Entnahme bereitsteht [219 S. B 46 ff.].

Auch im Heizsystem des Gebäudes können Wärmespeicher (Pufferspeicher) eingebunden sein. Sie kommen u. a. zum Einsatz, wenn eine Heizungsunterstützung durch eine Solarthermieanlage vorgesehen ist oder wenn der Heizwärmeerzeuger seine Wärmeabgabeleistung nicht ausreichend modulieren kann bzw. beim Teillastbetrieb/ bei erhöhter Taktung eine deutlich geringere Effizienz aufweist. Dies kann vor allem bei Biomasseheizkesseln (Stückholz, Hackschnitzel oder Pellets), Wärmepumpen und KWK-Anlagen der Fall sein. Für KWK-Anlagen ergibt sich durch einen Pufferspeicher auch die Möglichkeit, den Anlagenbetrieb etwas flexibler an der Stromnachfrage im Gebäude auszurichten [228].

---

<sup>25</sup> Zur ausführlichen Darstellung möglicher Systemgestaltungen und verschiedener Bauarten von Warmwasserspeichern vgl. [219 S. B 42 ff./220 S. H 180 ff.].

Bei den bisher beschriebenen Speichern handelt es sich um Kurzzeitspeicher, die aber durchaus Speicherdauern von mehreren Tagen erreichen können. Sogenannte saisonale Wärmespeicher sind dagegen auf deutlich längere Speicherdauern ausgerichtet. Sie weisen ein wesentlich größeres Volumen auf und können sowohl im Gebäude als auch außerhalb des Gebäudes im Boden angeordnet sein. Grundgedanke dieser Langzeitspeichersysteme ist die Übertragung des Wärmeangebots aus Solarthermieanlagen oder von Anlagen zur Raumkühlung im Sommer in die Heizperiode, in der die gespeicherte Wärme gegebenenfalls direkt oder als Wärmereservoir für Wärmepumpen genutzt werden kann. Gleichzeitig können diese Speicher auch als Kältereservoirs zur Raumkühlung im Sommer dienen. Die Ausführungsvarianten von Langzeitspeichern sind vielfältig.<sup>26</sup> Eine Einteilung kann hinsichtlich der Art der Speicherprinzips bzw. des Speichermediums in sensible Wärmespeicher (Wasser), Latentwärmespeicher (Wasser/Eis, Paraffine, Salzhydrate) und thermochemische Speicher (Metallhydride, Silikagel, Zeolith) vorgenommen werden. Latentwärmespeicher (auch PCM-Speicher – Phase Change Material) basieren auf dem Aggregatwechsel des Speichermediums beim Be- und Entladen des Speichers, wodurch eine hohe Energiedichte erreicht werden kann. Noch höhere Energiedichten bieten thermochemische Speicher. Hier beruht die zeitliche Energieübertragung allerdings nicht auf der Speicherung fühlbarer Wärme sondern auf geeigneten reversiblen Reaktionen (bspw. Sorptionsprozesse) [97/99 Kap. 7 S. 40].

Ein weiteres thermisches Speichersystem bildet die Bauteilmasse des Gebäudes. Sie trägt während der Heizzeit zur passiven Nutzung der Solarwärme bei. Die durch transparente Hüllflächen einfallende Solarstrahlung wird an den Raumbooberflächen absorbiert. Handelt es sich hierbei um massive Bauteile, kann die so gewonnene Wärme gespeichert und zeitverzögert an den Raum abgegeben werden. In die Bauteile der opaken Hüllfläche wird auch über ihre Außenseite durch die dort auftreffende Solarstrahlung Wärme eingetragen. Eine außenliegende herkömmliche Dämmung setzt diesen Wärmeeintrag allerdings stark herab. Um diese Strahlungsgewinne nutzbar zu machen ohne auf den Wärmeschutz durch eine Dämmung verzichten zu müssen, können sogenannte „Transparente Wärmedämmungen“ verwendet werden. Diese weisen struktur- bzw. materialbedingt eine hohe Lichtdurchlässigkeit auf (bspw. Aerogel). Der Bauteilspeichereffekt kann zusätzlich durch den Einsatz von PCM (bspw. PCM-haltige Putze) verstärkt werden [128 S. 109 f./178 S. 75 f.].

---

<sup>26</sup> Für einen ausführlichen Überblick zu verschiedenen Systemen vgl. [220 S. H 184 ff.].

### 2.4.3.2 Speicher für elektrische Energie

Der Markt für Batteriesysteme zur Stromspeicherung in Gebäuden ist noch sehr jung. Ein wirtschaftlicher Betrieb der verfügbaren Systeme ist vor allem aufgrund der nach wie vor hohen Anschaffungspreise bislang kaum möglich. Dementsprechend ist auch noch keine nennenswerte Verbreitung dieser Anlagen zu verzeichnen (Stand 2015). Für die nächsten Jahre werden jedoch erhöhte Zuwachsraten im Zusammenhang mit fallenden Anschaffungspreisen erwartet [49]. Im Moment werden Speichersysteme mit Blei-Säure-/Blei-Gel- und Lithium-Ion-, seltener Redox-Flow-Batterien angeboten [243]. Blei-Batterien erfordern deutlich geringere Anfangsauszahlungen sind jedoch den Lithium-Ion-Batterien (bspw. Lithium-Polymer, Lithium-Eisenphosphat oder Lithium-Kobaltoxid) hinsichtlich ihrer Zyklenlebensdauer und Entladetiefe sowie ihrem Wirkungsgrad unterlegen. Vielversprechende Entwicklungspotenziale für den Bereich der elektrochemischen Stromspeicher werden u. a. mit Lithium-Schwefel- und Lithium-Luft-Batterien verbunden [232 S. 22].<sup>27</sup>

Vorrangiger Einsatzzweck dieser Speicher ist bislang die Erhöhung der Stromeigenversorgung aus PV-Anlagen.<sup>28</sup> Hinsichtlich der Kopplung der Batterie mit der PV-Anlage wird zunächst zwischen DC- und AC-Systemen unterschieden. Während beim ersteren die Batterie im Zwischenkreis des Wechselrichters (Gleichstrom) eingebunden ist, erfolgt bei AC-Systemen der Anschluss an das Hausnetz (Wechselstrom). Bei sogenannten DC-Gen-Systemen wird die Batterie zwischen Solargenerator und Wechselrichter in den DC-Stromkreis geschaltet. Neuere Systeme sind flexibler einsetzbar und können sowohl von der DC- als auch von der AC-Seite geladen werden. Ein weiteres Unterscheidungskriterium bildet die Arbeitsweise. Einige Systeme speisen lediglich eine, andere alle drei der spannungsführenden Phasen des Hausnetzes.<sup>29</sup>

Der Gesamtwirkungsgrad des Speichersystems wird vom Systemaufbau, vor allem aber von der Batterienutzung und damit von den realisierbaren Teillastwirkungsgraden sowie dem Verbrauch während der Leerlaufzeiten stark beeinflusst. Eine pauschale Aussage hierzu ist nicht möglich. Weitere wesentliche Charakteristika eines solchen Speichersystems sind u. a. die maximale Be- und Entladeleistung sowie die genutzte Speicherkapazität der Batterie im Verhältnis zu ihrer Nennkapazität. Dieses Verhältnis bestimmt neben weiteren Faktoren maßgeblich ihre mögliche Nutzungsdauer [243].

---

<sup>27</sup> Ebenso zukunftsweisend ist die Integration mobiler Stromspeicher (Elektrofahrzeuge) in das Gebäudeenergiesystem. Vgl. hierzu bspw. [156].

<sup>28</sup> Aber auch der KWK-Bereich weckt langsam das Interesse der Hersteller [30].

<sup>29</sup> Vgl. hierzu und weiterführend zum Systemaufbau sowie den Vor- und Nachteilen der einzelnen Einbindungsvarianten [111/243]. Eine Übersicht am Markt verfügbarer Systeme wird hier ebenfalls gegeben.

#### 2.4.4 Wärmeverteilung in Wohngebäuden

Im Fall einer gebäude- oder wohnungszentralen Wärmeerzeugung übernehmen die Verteilungssysteme den Wärmetransport zu den einzelnen Anwendungsorten. Die Heizwärmebereitstellung erfolgt durch den Heizkreis mit den dazugehörigen Heizflächen zum Wärmeeintrag in die einzelnen Räume. Die Heizflächen werden nach der Art der Wärmeübertragung unterschieden in [220 S. H 192 ff.]:

- Konvektoren (vorrangig/ausschließlich Konvektion),
- Radiatoren und Kompaktheizkörper (Konvektion und Strahlung) sowie
- Plattenheizkörper und Flächenheizungen (vorrangig/ausschließlich Strahlung).

Der Wärmeeintrag durch Konvektion ermöglicht kürzere Aufheizzeiten als beim Wärmeeintrag durch Strahlung. Strahlungsheizflächen bieten jedoch bei gleicher Empfindungstemperatur ein angenehmeres Raumklima [220 S. H 192]. Ein wesentlicher Vorteil von Flächenheizungen (bspw. Fußbodenheizung) ist darin zu sehen, dass sie mit niedrigeren Vorlauftemperaturen die erforderliche Raumwärme bereitstellen können als andere Heizflächentypen. Einerseits werden dadurch die Wärmeverteilungsverluste reduziert. Andererseits eignen sie sich damit besonders für den Einsatz einer solarthermischen Heizungsunterstützung oder einer Wärmepumpe [128 S. 106].

Damit die benötigte Wärme zur Gewährleistung der erforderlichen Innentemperatur in einen Raum eingetragen werden kann, sind die Heizflächengröße und die Heizkreisauslegungstemperaturen (Vorlauf/Rücklauf) in Abhängigkeit der Raumheizlast aufeinander abzustimmen [VDI 6030]. Die Heizlast gibt an, welche Wärmeleistung bei winterlichen Norm-Witterungsbedingungen in einem Raum erforderlich ist, um die Wärmeverluste durch Transmission und Lüftung auszugleichen [DIN EN 12831]. Die Gesamtheizlast des Gebäudes bzw. der Wohneinheit ist dementsprechend maßgebend für die leistungsseitige Auslegung der Wärmeerzeuger. Die gleichmäßige bzw. bedarfsgerechte Wärmebereitstellung in jedem Raum wird durch den hydraulischen Abgleich des Systems erreicht. Zur Anpassung der Heizwärmebereitstellung an den tageszeitlich und saisonal schwankenden Bedarf wird in Abhängigkeit der Außentemperatur die Vorlauftemperatur geregelt (Heizkurve) [220 S. H 19, H 139, H 227].

Die Verteilung des Warmwassers im Falle der gebäudezentralen Erzeugung wird in der Regel über ein Zirkulationssystem sichergestellt. Das Versorgungssystem sollte so ausgelegt sein, dass die Temperatur am Austritt des Warmwassererzeugers während der Zirkulationszeiten mindestens 60 °C beträgt und bis zur Zapfstelle um höchstens 5 K absinkt [85 S. 8 f.]. Dies erfolgt einerseits aus hygienischen Gründen (Legionellenabwehr). Andererseits kann dadurch an jeder Zapfstelle des Systems unabhängig von der Entfernung zum Wärmeerzeuger sofort Warmwasser entnommen werden. Ein Teil der entnahmeunabhängigen Zirkulationswärmeverluste kann während der

Heizperiode zur Deckung des Raumwärmebedarfs beitragen. Bei diesem hohen Temperaturniveau besteht jedoch auch außerhalb der Heizperiode ein großes Wärmeverlustpotenzial. Zur Reduktion der Verluste kann die Zirkulation zu den Tageszeiten mit geringem Warmwasserbedarf gegebenenfalls unterbrochen werden. Zusätzlich ist eine gute Dämmung der Zirkulationsleitungen empfehlenswert. Eine entsprechende Nachrüstung im Rahmen von Gebäudemodernisierungsmaßnahmen kann jedoch in Abhängigkeit der Zugänglichkeit der Leitungen mit einem erheblichen baulichen Aufwand verbunden sein.

## Kapitel 3

# Rechtliche Rahmenbedingungen zur energetischen Wohngebäudemodernisierung

Dieses Kapitel widmet sich den relevanten Rahmenbedingungen von staatlicher Seite, welche in Abhängigkeit der Akteursrolle des Gebäudeeigentümers die Entscheidung zur Umsetzung von Modernisierungsmaßnahmen beeinflussen. Mit dem Unterkapitel 3.1 erfolgt der Einstieg in die energierechtlichen Bestimmungen und die monetären Anreize für Wohngebäudemodernisierungen sowie den Einsatz von Anlagen mit Kraft-Wärme-Kopplung und Photovoltaikanlagen zur dezentralen Stromerzeugung.<sup>30</sup> Daran anschließend werden im Unterkapitel 3.2<sup>s. 42</sup> wesentliche Regelungen des Mietrechts erörtert, welche für die ökonomische Beurteilung von Modernisierungen im Bereich der Gebäudebewirtschaftung maßgeblich sind. Die grundlegenden Aspekte des Steuerrechts für die betrachtete Entscheidungssituation sind Gegenstand des Unterkapitels 3.3<sup>s. 50</sup>.

Da die staatlichen Rahmenbedingungen einer kontinuierlichen Änderung unterliegen, kann natürlich nur eine Momentaufnahme wiedergegeben werden. Im Wesentlichen orientieren sich die Ausführungen an den Gegebenheiten Ende 2014/Anfang 2015. Dieser Stand bildet auch die Grundlage für die vorgesehene Modellentwicklung.

### 3.1 Energierechtsrahmen und Förderinstrumente

Ziel dieses Unterkapitels ist zunächst die zusammenfassende Darstellung der energierechtlichen Regelungen und Fördermaßnahmen, welche den ordnungsrechtlichen und ökonomischen Instrumenten der Umweltpolitik zuzuordnen sind [198<sup>s. 26</sup>].

---

<sup>30</sup> Im Folgenden auch als objektinterne Stromerzeugungsanlagen bezeichnet.

### 3.1.1 Energieeinsparungsgesetz

1976 schaffte der Bund mit dem Energieeinsparungsgesetz (EnEG) die rechtliche Grundlage, um Einfluss auf den Gebäudeenergiebedarf nehmen zu können. Von staatlicher Seite gab es bis dato keine Vorgaben zu technischen Parametern von Heizungsanlagen, zur Regelungstechnik oder zur energetischen Ausprägung der Gebäudehülle. Das EnEG ermöglichte erstmals, konkrete gesetzlich verankerte Mindestanforderungen zu stellen, um den Energiebedarf von Gebäuden zu beschränken.<sup>31</sup>

Der Gesetzeserlass fokussierte anfangs noch nicht auf den Schutz der Umwelt, sondern wurde vorrangig aus strategischen und der Versorgungssicherheit dienenden Gesichtspunkten heraus vorangetrieben. Drei Jahre zuvor hatte die erste Ölkrise nicht nur Deutschland, sondern alle Industrienationen schockiert und ihnen den Einfluss der Rohölverfügbarkeit auf ihre Wirtschaften deutlich ins Bewusstsein gerufen.<sup>32</sup> Auf nationaler Ebene war das EnEG nur eine von mehreren Initiativen der Bundesregierung mit dem übergeordneten Ziel, die eigene Energieversorgung zu sichern und die Importabhängigkeiten zu reduzieren.<sup>33</sup>

Auf Grundlage des EnEG trat 1977 die erste Wärmeschutzverordnung in Kraft. Durch sie wurden Vorgaben zur bauphysikalischen Gestaltung der Gebäudehülle zunächst für Neubauten verbindlich. Zusätzlich nahm sich die ab 1978 geltende Heizungsanlagenverordnung der Effizienz der gebäudeinternen Wärmeversorgungstechnik an. Hier wurden konkrete Vorgaben u. a. zur Begrenzung der Wärmeerzeugungsleistung und der Abgasverluste, zur Dämmung der Verteilungsanlagen und zur Installation von Steuer- bzw. Regelungseinrichtungen definiert. Im Zuge mehrerer Novellierungen in den Folgejahren wurden die Anforderungen in den Verordnungen schrittweise erhöht und ihr Geltungsbereich auch auf Bestandsgebäude erweitert. Beide Verordnungen wurden im Rahmen der ersten Energieeinsparverordnung 2002 zusammengeführt.

---

<sup>31</sup> Zwar existierten bereits normative Richtlinien zum Wärmeschutz im Hochbau (DIN 4110 (1934), DIN 4108 (1952)), allerdings dienten diese vorrangig der grundlegenden Sicherstellung der Gebäudefunktionen im Hinblick auf Gesundheit und Behaglichkeit. Der Energieverbrauch war aufgrund der niedrigen Rohstoffbezugpreise nur von untergeordneter Bedeutung. Auf den Zusammenhang von Wärmeschutz und Hausbewirtschaftungskosten wurde in den Normen lediglich hingewiesen [259<sup>S. 45</sup>].

<sup>32</sup> Die Öl(preis)krise 1973 war die Folge einer bewussten Fördermengendrosselung durch die OPEC (Organization of the Petroleum Exporting Countries) als Reaktion auf die Unterstützung Israels durch die westlichen Staaten im Jom-Kippur-Krieg. Neben der plötzlichen Vervielfachung des Rohölpreises resultierte der Schock vor allem daraus, dass die OPEC-Staaten die Rohölexporte erstmals einvernehmlich und wirksam als Druckmittel (sogenannte „Ölwaffe“) einsetzten [142<sup>S. 158</sup>].

<sup>33</sup> Beispielsweise neben dem Energiesicherungsgesetz, dem Genehmigungsstopp für Ölkraftwerksneubauten und der Ausweitung der Kohleschutzpolitik [84<sup>S. 43</sup>].

### 3.1.2 Energieeinsparverordnung

Mit der Energieeinsparverordnung (EnEV) wurde ein grundsätzlicher Wandel bei den Ansatzpunkten gesetzlicher Bestimmungen zur Energieeinsparung im Gebäudebereich vollzogen. Während die Vorgängerregelungen auf qualitative Einzelbauteilanforderungen fokussierten, werden durch die EnEV Anforderungen auf der Grundlage einer energetischen Bilanzierung des gesamten Gebäudes definiert und neben der erforderlichen Nutzenergie auch der Energieverlust und -aufwand für die gebäudeinterne Wärmeerzeugung und -verteilung mit in die Betrachtung einbezogen.<sup>34</sup> Der so ermittelbare Jahresendenergiebedarf des Gebäudes allein ist als Bewertungsmaßstab jedoch nicht geeignet, um die unterschiedlichen Technologie- und Energieträgeroptionen zur Versorgung des Gebäudes adäquat berücksichtigen zu können.<sup>35</sup> Da die Gebäudenutzung letztendlich auch Treiber des Energieaufwandes für Umwandlung, Transport und Speicherung eines Energieträgers bis zur Gebäudegrenze ist, werden die Vorketten zu dessen Bereitstellung ebenfalls in die Bilanzierung eingeschlossen. Dies erfolgt, indem die zur Deckung des Endenergiebedarfs einzusetzenden Energieträgermengen jeweils mit einem spezifischen Primärenergiefaktor multipliziert werden. Der damit errechnete Jahresprimärenergiebedarf des Gebäudes stellt eine der relevanten EnEV-Kenngrößen dar. Als zweite Kenngröße nimmt die Verordnung auf den spezifischen Transmissionswärmeverlust der thermischen Gebäudehülle Bezug, welcher die mittlere energetische Qualität der Gebäudehülle widerspiegelt.

Handlungszwänge hinsichtlich dieser Gebäudekennwerte definiert die EnEV jedoch nur für Neubauten. Für Bestandsgebäude beschränkt sie sich nach wie vor auf die Vorgabe einzuhaltender U-Werte für Bauteile der wärmeübertragenden Umfassungsfläche, sofern diese maßgeblich geändert bzw. instand gesetzt werden. Die Vorgaben sind allerdings nur verbindlich, sofern die Grenzwerte zum Jahresprimärenergiebedarf und zum spezifischen Transmissionswärmeverlust eines vergleichbaren Neubaus beim Bestandsgebäude um mehr als 40 % überschritten werden.

Der Grenzwert zum Jahresprimärenergiebedarf ist für Wohngebäude seit 2009 auf Grundlage des Referenzgebäudeverfahrens zu ermitteln, um der spezifischen Gebäudecharakteristik gerecht zu werden. Die Berechnung kann laut der EnEV-Fassung von 2014 entweder nach DIN V 18599 oder für Wohngebäude ohne technische Ausstat-

---

<sup>34</sup> In der letzten Novellierung der Wärmeschutzverordnung 1995 waren bereits Vorgaben zur Beschränkung des Jahresheizwärmebedarfs verankert. Die Verluste der Wärmebereitstellung und die hierfür notwendigen Hilfsenergien blieben jedoch außen vor [137<sup>s.8</sup>].

<sup>35</sup> Beispielsweise weist die Versorgungsvariante „Stromheizung“ geringere Umwandlungs- und Verteilungsverluste zur Bereitstellung der benötigten Nutzwärme innerhalb des Gebäudes auf als die Versorgungsvariante „Gas-Brennwertkessel“. Unberücksichtigt bliebe dabei der höhere Energieeinsatz zur Bereitstellung des Energieträgers Strom gegenüber dem des Energieträgers Gas am Hausanschluss.

tungen zur Kühlung nach DIN V 4108-6 in Verbindung mit DIN V 4701-10 erfolgen. Die Anrechnung von objektintern erzeugtem Strom aus erneuerbaren Energien in diesem Zusammenhang wird zwar explizit nur für Neubauten benannt, kann aber auch für Bestandsgebäude vorgenommen werden.<sup>36</sup>

Vom Instandsetzungsfall unabhängige Handlungspflichten definiert die EnEV 2014 nur hinsichtlich der Dämmung zugänglicher Wärmeversorgungsleitungen, der Dämmung des oberen Gebäudeabschlusses im Falle eines unzureichenden Mindestwärmeschutzes sowie des altersbedingten Ersatzes bestimmter Wärmeerzeugungsanlagen.

### 3.1.3 Erneuerbare-Energien-Wärmegesetze

Ziel des Erneuerbare-Energien-Wärmegesetzes (EEWärmeG) ist die Steigerung des Einsatzes regenerativer Energien zur Bereitstellung von Wärme und Kälte, deren Deckungsanteil am entsprechenden Endenergieverbrauch 14 % bis 2020 erreicht haben soll. Das Gesetz gilt mit einigen Ausnahmen für alle Neubauten. Für Altbauten beschränkt sich die Anwendung im Falle grundlegender Renovierungsmaßnahmen auf bestimmte Nichtwohngebäude, die sich im Eigentum oder Besitz der öffentlichen Hand befinden.<sup>37</sup> Allerdings räumt das Gesetz den Bundesländern das Recht ein, mit landesspezifischen Regelungen die Nutzungspflicht für Erneuerbare Energien auch auf Bestandswohngebäude auszuweiten, weshalb es hier mit erwähnt wird. Bislang hat aber nur Baden-Württemberg ein entsprechendes Landesgesetz – das Erneuerbare-Wärme-Gesetz (EWärmeG) – verabschiedet, welches auch Handlungspflichten für Bestandswohngebäude beinhaltet.

Das bundeseinheitlich geltende EEWärmeG definiert verschiedene technologie- bzw. energieträgerspezifische Mindestdeckungsanteile am Wärme- und Kältebedarf des Gebäudes, durch welche die Nutzungspflicht jeweils separat erfüllt werden kann. Konkret nimmt es hierbei Bezug auf solare Strahlungsenergie, Biomasse (fest, flüssig, gasförmig), Geothermie und Umweltwärme. Ebenso ist es möglich, durch definierte Ersatzmaßnahmen den Anforderungen separat gerecht zu werden. Hierzu zählen u. a. der verstärkte Einsatz von KWK oder die Übererfüllung der EnEV-Vorgaben. Das Gesetz beinhaltet technische Mindestanforderungen an die einzusetzenden Energiebereitstellungsanlagen und erlaubt es auch, der Nutzungspflicht durch eine Kombination anteilig erfüllter Einzelbedingungen oder durch eine pauschale Größenauslegung der Solaranlage in Abhängigkeit der Gebäudenutzfläche nachzukommen.

---

<sup>36</sup> Aufgrund des § 9 Abs. 2 in Verbindung mit dem § 5 EnEV.

<sup>37</sup> Ob mit dieser Einschränkung den Vorgaben der Richtlinie 2009/28/EG genüge getan ist (Nutzungspflicht für Erneuerbare Energien bei der Wärme- und Kältebereitstellung in Neu- und Altbauten), ist abzuwarten. So könnte das EEWärmeG zukünftig auch für Bestandswohngebäude Handlungspflichten definieren.

Das in Baden-Württemberg geltende EWärmeG definiert ergänzende Vorgaben zum EEWärmeG und verpflichtet mit der Novellierung 2015 die Eigentümer von Bestandswohngebäuden im Falle wesentlicher Änderungen an der Heizanlage, mindestens 15 % des Wärmebedarfs durch Erneuerbare Energie zu decken [199]. Die Möglichkeit, den Anforderungen durch Ersatzmaßnahmen und Kombinationen aus teilweise erfüllten Einzelbedingungen gerecht zu werden, ist ebenfalls gegeben.

### 3.1.4 Erneuerbare-Energien-Gesetz

Auf Grundlage des Erneuerbare-Energien-Gesetzes (EEG) werden Technologien zur Stromerzeugung aus erneuerbaren Energiequellen hinsichtlich ihrer Markt- und Netzintegration gefördert. Bis 2050 sollen 80 % des nationalen Bruttostromverbrauchs darüber gedeckt werden können. Die Belange eines Gebäudeeigentümers tangiert das EEG, wenn er die Installation einer PV-Anlage erwägt. Aber auch die Förderung von KWK-Anlagen kann auf Grundlage dieses Gesetzes erfolgen, sofern sie mit erneuerbaren Energieträgern (bspw. Biogas) betrieben werden.

Das EEG regelt den vorrangigen Anschluss der Anlagen an das öffentliche Stromnetz sowie die Pflicht des Netzbetreibers, den bereitgestellten Strom physisch abzunehmen und zu übertragen. Die Einspeiseleistung der Anlagen muss im Falle einer drohenden Netzüberlastung per Fernsteuerung durch den Netzbetreiber reduziert werden können. Diese Vorgabe gilt für KWK-Anlagen  $> 100 \text{ kW}_{\text{el}}$  und für alle PV-Anlagen. Für PV-Anlagen  $< 30 \text{ kW}_{\text{p}}$  kann alternativ die Einspeiseleistung generell auf 70 % der installierten Leistung beschränkt werden. Des Weiteren werden im EEG Fördersätze für den erzeugten und in das öffentliche Netz eingespeisten Strom u. a. in Abhängigkeit des dafür eingesetzten Energieträgers und der Anlagengröße definiert. Die Fördersätze verringern sich monatlich um einen bestimmten Prozentwert zum jeweiligen Vormonatswert. Diese Degression kann jedoch auch höher oder niedriger ausfallen. Entsprechende Anpassungen werden in Abhängigkeit der Entwicklung des realen Anlagenzubaus gegenüber dem definierten Zielkorridor für den Anlagenzubau vorgenommen. Mit der Inbetriebnahme bleibt der zu diesem Zeitpunkt gültige Fördersatz für die Anlage allerdings konstant für die gesamte Förderdauer. Diese beträgt 20 Kalenderjahre zuzüglich des verbleibenden Zeitraums im Jahr der Inbetriebnahme. Hinsichtlich der Differenzierung der Fördersätze nach der Anlagenleistung ist zu berücksichtigen, dass der Fördersatz entsprechend den vorgegebenen Leistungsklassen gewichtet zu errechnen ist.<sup>38</sup>

---

<sup>38</sup> Beispielsweise beträgt der anzusetzende Fördersatz für eine PV-Anlage mit  $30 \text{ kW}_{\text{p}}$  bei  $13,5 \text{ ct/kWh}$  bis  $10 \text{ kW}_{\text{p}}$  und  $12,8 \text{ ct/kWh}$  bis  $40 \text{ kW}_{\text{p}}$  installierter Leistung:  $\frac{10}{30} \cdot 13,5 + \frac{30-10}{30} \cdot 12,8 \approx 13,03 \text{ ct/kWh}$ .

Da EEG-relevante Anlagen in bzw. an Wohngebäuden in der Regel eher geringe Leistungsgrößen aufweisen, bieten sich zur Inanspruchnahme der EEG-Förderung für den erzeugten und nicht im Objekt verbrauchten Strom vor allem folgende zwei Möglichkeiten an. Die erste Möglichkeit besteht darin, den Strom an einen entsprechenden Dienstleister zur Direktvermarktung zu verkaufen. In diesem Fall hat der Anlagenbetreiber gegenüber dem Netzbetreiber zusätzlich einen Anspruch auf die Zahlung der Marktprämie. Diese errechnet sich monatlich in Abhängigkeit des zur Erzeugung eingesetzten Energieträgers aus der Differenz zwischen dem anzusetzenden EEG-Fördersatz und dem mittleren Monatsmarktwert des Stroms am Spotmarkt der EPEX Spot SE-Strombörse in Paris. Die zweite Möglichkeit besteht darin, den Strom an den Netzbetreiber zu verkaufen, in dessen Netz eingespeist wird, und hierfür eine festgelegte Vergütung zu erhalten. Diese Einspeisevergütung liegt jedoch etwas unterhalb des jeweils anzusetzenden EEG-Fördersatzes.

Die EEG-Förderung wird über die EEG-Umlage finanziert. Diese Umlage ist Teil des Endnutzerpreises beim Strombezug von einem Lieferanten. Auf Grundlage der EEG-Novelle 2014 wird nun auch für den bis dato umlagebefreiten Eigenstromverbrauch des Anlagenbetreibers eine anteilige EEG-Umlage erhoben. Dieser Anteil beträgt für 2015 30 % steigt bis 2017 schrittweise auf einen Anteil von 40 % des jeweils gültigen Umlagebetrags an. Für kleine Anlagen mit maximal 10 kW elektrischer Leistung wird eine Bagatellregelung eingeräumt. Nach dieser sind bis zu 10 MWh des selbst verbrauchten Stroms aus solchen Kleinanlagen von der EEG-Umlage befreit. Für die objektinterne Stromlieferung an Dritte war die EEG-Umlage auch schon vor der Gesetzesnovelle abzuführen, jedoch konnte für den Strom aus einer PV-Anlage dabei das Grünstromprivileg in Anspruch genommen werden. Damit ließ sich die Umlage um 2 ct/kWh reduzieren. Dieses Privileg wurde mit der Novelle 2014 aufgehoben.

### **3.1.5 Kraft-Wärme-Kopplungs-Gesetz**

Der Regelungsinhalt des Kraft-Wärme-Kopplungs-Gesetzes (KWKG) bezieht sich auf die Abnahme und Vergütung von Strom aus KWK-Anlagen aller Größenklassen. Eine Ausnahme bilden KWK-Anlagen, welche nach § 19 EEG gefördert werden. Der Anlagenbetreiber muss sich also entscheiden, ob er seine Anlage auf Grundlage des KWKG oder des EEG bewirtschaftet. Das KWKG zielt darauf ab, den KWK-Anteil an der deutschen Stromerzeugung bis 2020 auf 25 % zu erhöhen. Ebenso soll die Markteinführung der Brennstoffzellentechnologie unterstützt und das Einsatzpotenzial der Anlagen durch den Ausbau und die Modernisierung von thermischen Netzen und Speichern gesteigert werden. Das KWKG regelt deshalb auch Zuschläge für letztere.

Neben den Vorgaben zur vorrangigen Anlagenanschluss- und Stromabnahmepflicht durch die Netzbetreiber, sind für die Bewirtschaftung einer KWK-Anlage vor allem die Vergütungsregelungen des KWKG für den erzeugten Strom relevant. Diese sind von der elektrischen Anlagenleistung abhängig. Eine KWK-Anlage für ein Wohngebäude wird in der Regel dem ersten Leistungsbereich kleiner 50 kW<sub>el</sub> zuzuordnen sein. Für sehr große Wohngebäude oder räumlich zusammenhängende Gebäudeverbände sind aber auch größere Leistungsklassen vorstellbar. In der Fassung des KWKG von 2012 erhält der Anlagenbetreiber für den erzeugten Strom aus einer Anlage bis 50 kW<sub>el</sub> einen Zuschlag von 5,41 ct/kWh, unabhängig davon, ob dieser objektintern verbraucht oder ins öffentliche Versorgungsnetz eingespeist wird. Für eine Anlage größer 50 bis 250 kW<sub>el</sub> reduziert sich dieser Zuschlag anteilig auf 4 ct/kWh.<sup>39</sup> Die Zuschlagzahlung wird für 30.000 Volllaststunden gewährt. Für Anlagen bis 50 kW<sub>el</sub> kann alternativ ein Zuschlagzeitraum von 10 Jahren gewählt werden. Im Falle einer sehr kleinen KWK-Anlage bis 2 kW<sub>el</sub> besteht zusätzlich die Möglichkeit, den Zuschlag für 30.000 Volllaststunden als pauschale Vorauszahlung unmittelbar nach der Inbetriebnahme zu erhalten. Wäre alternativ eine Wärmeversorgung des Gebäudes über ein bestehendes Fernwärmenetz möglich, kann die Zuschlagförderung unter bestimmten Bedingungen ausgeschlossen sein (keine Förderung der Fernwärmeverdrängung). Eine Voraussetzung dafür ist u. a., dass die Fernwärme zu mindestens 60 % aus KWK-Anlagen stammt [18]. Die KWK-Zuschlagförderung wird im Rahmen der Netznutzungsentgelte auf die Stromendnutzer umgelegt (KWK-Umlage).

Für den ins öffentliche Netz eingespeisten Strom hat der Anlagenbetreiber einen Anspruch auf eine Vergütung durch den Netzbetreiber. Diese kann prinzipiell frei vereinbart werden, entspricht aber in der Regel dem durchschnittlichen Grundlaststrompreis des jeweils vorgelagerten Quartals an der European Energy Exchange (EEX) Strombörse. In diesem Fall erhält der Anlagenbetreiber zusätzlich die durch seine Einspeisung vermiedenen Netznutzungsentgelte, welche für den abnehmenden Netzbetreiber beim alternativen Strombezug aus den übergeordneten Netzen der höheren Spannungsebenen sonst angefallen wären. Der Anlagenbetreiber hat aber auch die Möglichkeit, seinen Strom direkt an Dritte zu vermarkten. In diesem Zusammenhang ist zu beachten, dass für KWK-Anlagen größer 50 kW<sub>el</sub> die Ankaufspflicht des Netzbetreibers erlischt, wenn keine Zuschlagzahlungen mehr für den erzeugten Strom beansprucht werden können. Die physische Stromabnahme ist aber weiterhin zu gewährleisten.

---

<sup>39</sup> Bspw. beträgt der Zuschlag für eine Anlagenleistung von 55 kW<sub>el</sub>:  $\frac{50}{55} \cdot 5,41 + \frac{55-50}{55} \cdot 4 \approx 5,28$  ct/kWh<sub>el</sub>.

### 3.1.6 Weitere relevante Regelungen für den Stromanlagenbetrieb

Der Betrieb einer stromerzeugenden Anlage in bzw. an einem Wohngebäude tangiert noch eine Reihe weiterer energierechtlicher Rahmenbedingungen, welche einen Einfluss auf ihre ökonomische Bewertung haben. Hierzu zählt zunächst die Entlastung von der Energiesteuer für den Brennstoffeinsatz in KWK-Anlagen gemäß dem Energiesteuergesetz (EnergieStG). Handelt es sich um eine hocheffiziente Anlage (Nutzungsgrad  $\geq 70\%$ ) kann für den steuerlichen Abschreibungszeitraum (siehe Abschnitt 3.3.1<sup>S. 51</sup>) eine Energiesteuerbefreiung beantragt werden. Sofern Hauptbestandteile dieser Anlagen erneuert werden (bspw. das Antriebsaggregat oder der Generator), verlängert sich der Befreiungszeitraum bis zur vollständigen steuerlichen Abschreibung dieser Komponenten. Danach kann eine verringerte Steuerentlastung in Anspruch genommen werden. Darüber hinaus wird für die objektintern erzeugten und verbrauchten Strommengen aus KWK- und PV-Anlagen mit einer elektrischen Leistung  $\leq 2$  MW entsprechend dem Stromsteuergesetz (StromStG) keine Stromsteuer erhoben. Letztendlich fallen für diese Strommengen auch keine Netznutzungsentgelte und Konzessionsabgaben an, da in der Regel kein öffentliches Netz beansprucht wird. Dementsprechend entfallen ebenso die Aufschläge auf die Netzentgelte, welche Preisbestandteile beim Strombezug von einem externen Versorger sind. Dazu zählen:

- die Offshore-Haftungsumlage gemäß § 17f Energiewirtschaftsgesetz (EnWG),
- die Umlage gemäß § 18 der Verordnung zu abschaltbaren Lasten (AbLaV),
- die Umlage gemäß § 19 Stromnetzentgeltverordnung (StromNEV) sowie
- die bereits erwähnte KWK-Umlage gemäß § 9 KWKG.

### 3.1.7 Staatliche Fördermittel zur Anfangsfinanzierung von energetischen Wohngebäudemodernisierungen

Durch Fördermittel zur Anfangsfinanzierung beabsichtigt die öffentliche Hand, die Attraktivität von energetischen Gebäudemodernisierungen für die Eigentümer zu steigern und die Maßnahmenumsetzung voranzutreiben. Die Mittel werden im Rahmen von verschiedenen Förderprogrammen auf Bundes- und Landesebene sowie teilweise auch direkt von einzelnen Kommunen bereitgestellt. Davon werden im Folgenden lediglich die Förderanstrengungen des Bundes zur energetischen Modernisierung des Gebäudebestands kurz skizziert.

Wichtigster Fördermittelgeber auf Bundesebene ist die Kreditanstalt für Wiederaufbau (KfW-Bankengruppe). Die KfW stellt die Fördermittel in Form von zinsverbilligten Darlehen und Investitionszuschüssen bereit.

Für die Thematik der vorliegenden Arbeit relevante KfW-Förderprogramme sind (Stand 2015 [158]):

- die Programme 151/152 – Kredite zur Sanierung zum KfW-Effizienzhaus oder für energetische Einzelmaßnahmen,
- das Programm 167 – Ergänzungskredite für Anlagen zur Wärmebereitstellung aus erneuerbaren Energien,
- die Programme 274/275 – Kredite für Photovoltaikanlagen und damit verbundene Stromspeicher,
- das Programm 430 – Investitionszuschuss zur Sanierung zum KfW-Effizienzhaus oder für energetische Einzelmaßnahmen und
- das Programm 431 – Zuschuss für professionelle Dienstleistungen der Beratung, Planung und Baubegleitung im Rahmen der energetischen Sanierung.

Bei der Förderung von Einzelmaßnahmen sind je nach Art der Maßnahme gegebenenfalls strengere Anforderungen zu erfüllen, als sie die EnEV vorgibt. Wird durch das gesamte Maßnahmenbündel ein Standard gemäß einem KfW-Effizienzhaus (KfW-EH) erreicht, werden attraktivere Förderkonditionen geboten. Die EH-Standards werden anhand der Gebäudekenngrößen „Primärenergiebedarf“ und „Transmissionswärmeverlust“ definiert. Ihre Bezeichnungen spiegeln die einzuhaltenden Grenzwerte für den Primärenergiebedarf wider, damit ein Gebäude dem jeweiligen Standard gerecht wird. Bezugsgröße für den KfW-EH 100-Standard ist der Primärenergiebedarf des vergleichbaren Referenzgebäude Neubaus nach den EnEV-Vorgaben. Der KfW-EH 55-Standard ist eingehalten, wenn der Primärenergiebedarf des Gebäudes maximal 55 % des Referenzbedarfs beträgt. Entsprechend sind die Grenzwerte für die anderen derzeit vorgegebenen Standards EH 70, EH 85 und EH 115 definiert. Hinsichtlich der Beschränkung des Transmissionswärmeverlustes gelten abweichende Prozentvorgaben mit Bezug auf den Transmissionswärmeverlust des Referenzgebäudes.

Für welche Maßnahmen die KfW-Mittel in Anspruch genommen werden können, ist in den einzelnen Programmregularien genauer definiert. Die Förderung beschränkt sich dabei nicht nur auf den Modernisierungsanteil der Maßnahmen, sondern umfasst auch die Instandsetzungsanteile und gegebenenfalls erforderliche Nebenarbeiten [160]. Investitionszuschüsse können direkt bei der KfW beantragt werden. Die Auszahlung erfolgt nach Abschluss der Arbeiten und Erfüllungsnachweis der gestellten Anforderungen. Die Zuschusshöhe wird als prozentualer Anteil an den förderfähigen Aufwendungen bestimmt und ist in Abhängigkeit der Wohneinheitenanzahl auch absolut beschränkt. Je anspruchsvoller ein gegebenenfalls erreichter EH-Standard ist, desto höher fällt in der Regel der Zuschussanteil aus.

Über die KfW-Kredite können bis zu 100 % der förderfähigen Aufwendungen finanziert werden. Der maximale Kreditbetrag pro Wohneinheit ist beschränkt und davon abhängig, ob ein EH-Standard angestrebt wird. Die Kredite werden nicht direkt von der KfW vergeben, sondern über andere Finanzierungsinstitute (Banken, Sparkassen etc.) vermittelt, mit denen ein entsprechender Vertrag abzuschließen ist. Die Förderung besteht hier vor allem in der Zinsverbilligung der angebotenen Darlehen. Der reduzierte Zinssatz gilt konstant für einen bestimmten Zeitraum (erste Zinsbindungsfrist). Bei Darlehen mit über diesen Zeitraum hinausreichenden Laufzeiten unterbreitet die KfW dem vermittelnden Kreditinstitut ein Angebot zur Anschlussfinanzierung ohne Zinsverbilligung für den Restschuldbetrag am Ende der ersten Zinsbindungsfrist. Sofern ein EH-Standard nach Abschluss der Arbeiten erreicht ist, wird im Programm 151 zusätzlich ein einmaliger Tilgungszuschuss als prozentualer Anteil am anfänglichen Darlehensbetrag gewährt. Der Prozentsatz dieses Zuschusses ist umso höher, je anspruchsvoller der nachgewiesene EH-Standard ist. Ebenso kann der Kreditnehmer während der ersten Zinsbindungsfrist ohne zusätzliche Kosten die Rückzahlung des Schuldbetrages durch Sondertilgungen beschleunigen.

Weitere für die Gebäudemodernisierung relevante Fördermittel auf Bundesebene stellt das Bundesamt für Wirtschaft und Ausfuhrkontrolle (BAFA) bereit [15]. Hierbei handelt es sich vorrangig um technologiespezifische Investitionszuschüsse. Förderungsschwerpunkte sind u. a. die Wärmebereitstellung aus erneuerbaren Energien (Solarthermie, Biomasse und Umweltwärme) sowie der Einsatz der Kraft-Wärme-Kopplung. Die Höhe der nicht rückzuzahlenden Zuschüsse wird vorrangig durch die Größe bzw. Leistungsfähigkeit der geförderten Anlagen bestimmt, welche konkreten technischen Mindestanforderungen gerecht werden müssen. Darüber hinaus werden verschiedene Bonuszuschüsse für bestimmte Anlagenkombinationen oder Kombinationen mit EH-Standards gewährt. Auch die Verbesserung bzw. Nachrüstung bestehender Anlagen zur Steigerung der Energieeffizienz wird gefördert.

## 3.2 Mietrechtsrahmen

Während der selbstnutzende Eigentümer eines Gebäudes durch die Reduktion seiner Energieversorgungskosten von einer energetischen Modernisierung profitieren kann, ist für den Vermieter der Einfluss auf seine Mieteinnahmen ein wesentliches Entscheidungskriterium zur Maßnahmenumsetzung. Die Vermietung von Wohnraum unterliegt in Deutschland einer wesentlich stärkeren Reglementierung als andere Mietverhältnisse. Die entsprechenden Vorgaben sind im Bürgerlichen Gesetzbuch (BGB) verankert und definieren die Rechte und Pflichten der Mietvertragsparteien. Zu den Pflichten des Vermieters zählt u. a., den Wohnraum für die vertragsgemäße

Nutzung herzurichten und diesen Zustand für die Laufzeit des Mietverhältnisses auch zu erhalten. Abnutzungen bzw. Verschlechterungen der Mietsache durch vertragsgemäße Nutzung gehen zu seinen Lasten. Ebenso hat er die ausreichende Versorgung des Mieters mit Wasser und Energie sicherzustellen bzw. ihm diese zumindest technisch zu ermöglichen [38 § 535 Rn. 109].

In diesem Unterkapitel werden wesentliche, aus wirtschaftlicher Vermietersicht relevante Regelungen des BGB zur Mietpreisbildung im Zusammenhang mit der energetischen Gebäudemodernisierung beleuchtet.<sup>40</sup> Dazu zählen vor allem die gesetzlichen Vorgaben zur Mietpreisbildung mit den Möglichkeiten, den Mieter an der Finanzierung der Maßnahmen zu beteiligen. Abschließend werden noch die Bestimmungen zur Umlage der laufenden Betriebskosten auf den Mieter erörtert, über die eine entsprechende Vereinbarung im Mietvertrag zu treffen ist.

### 3.2.1 Das Vergleichsmietpreisniveau

Das Vergleichsmietpreisniveau (auch ortsübliche Vergleichsmiete) stellt eine wichtige Bezugsgröße für die Mietpreisbildung dar. Es spiegelt die mittlere Spanne bzw. den Durchschnitt der Mietpreise für vergleichbaren Wohnraum (Lage, Größe, Ausstattung, Art und Beschaffenheit) in der derselben bzw. einer ähnlichen Gemeinde wider, welche in den letzten vier Jahren neu vereinbart bzw. geändert worden sind.

Das relevante Vergleichsmietpreisniveau für eine bestimmte Wohnung kann auf Informationen aus einem Mietspiegel oder einer Mietdatenbank, auf das Gutachten eines Sachverständigen sowie auf nachweisbare Mietzahlungen für mindestens drei vergleichbare Wohnungen gestützt werden. Wird in einer Gemeinde ein Mietspiegel erstellt, gibt dieser einen Überblick zu den Vergleichsmietpreisen anhand der oben genannten fünf Wohnwertmerkmale. Die einfache Form eines Mietspiegels ist von Interessenvertretern der Vermieter und Mieter gemeinsam zu erstellen und anzuerkennen sowie alle zwei Jahre an die Marktentwicklung anzupassen. Eine besondere Form stellt der qualifizierte Mietspiegel dar. Dieser ist nach anerkannten wissenschaftlichen Grundsätzen zu erarbeiten und – zusätzlich zur Aktualisierung nach zwei Jahren – alle vier Jahre neu zu erstellen.

Seit dem Inkrafttreten des Mietrechtsänderungsgesetzes (MietRÄndG) 2013 ist explizit auch der energetische Zustand des Gebäudes im Rahmen des Wohnwertmerkmals „Beschaffenheit“ als Kriterium zur Differenzierung des Vergleichsmietpreises heranzuziehen [38 § 558 Rn. 80]. Demensprechend sollten energetische Modernisierungsmaßnahmen einen Einfluss auf die Höhe der anzusetzenden Vergleichsmiete haben und

<sup>40</sup> Vgl. [§§ 536, 555b, 556, 556a, 556d, 557-559a BGB].

gegenüber energetisch weniger modernisierten, sonst aber vergleichbaren Wohnungen zusätzliche Mietpreissteigerungen erlauben. Einige Gemeinden, wie bspw. Darmstadt [188] oder Regensburg [246], hatten bereits vor dem MietRÄndG sogenannte ökologische Mietspiegel erstellt, in denen u. a. energetische Gebäudekennwerte bei der Vergleichsmietpreisermittlung Berücksichtigung fanden.

### 3.2.2 Modernisierungsumlage nach § 559 BGB

Werden Gebäudemodernisierungen durchgeführt, hat der Vermieter die Möglichkeit, jährlich bis zu 11 % der dafür aufgewendeten und anrechnungsfähigen Auszahlungen auf die Miete umzulegen (Modernisierungsumlage).<sup>41</sup> Mit Fokus auf die energetische Wohngebäudemodernisierung zählen hierzu alle Maßnahmen, die zu einer nachhaltigen Reduktion des Gebäudeendenergiebedarfs führen. Aufwendungen für Maßnahmen, die zwar den Bedarf an nichterneuerbarer Primärenergie verringern, jedoch nicht den Endenergiebedarf des Gebäudes reduzieren (bspw. eine PV-Anlage), sind dagegen nicht umlagefähig.

Durch diese Abgrenzung wird deutlich, dass sich die energetische Modernisierung auf die Mietsache beziehen muss, um für eine Umlage auf den Mieter in Betracht zu kommen. Eine bestimmte mindestens zu erreichende Energieeinsparung ist allerdings eben so wenig eine notwendige Voraussetzung wie ein daraus resultierender ökonomischer Vorteil für den Mieter.<sup>42</sup> Darüber hinaus kann sich die Umlagefähigkeit von energetischen Modernisierungen auch durch die dauerhafte Verbesserung der allgemeinen Wohnverhältnisse oder der nachhaltigen Erhöhung des Gebrauchtwertes der Mietsache begründen. Ein Beispiel hierfür wäre der Einbau von Isolierglasfenstern mit verbessertem Schallschutz.<sup>43</sup> Nicht zuletzt sind Maßnahmen umlagefähig, die aufgrund von gesetzlichen Vorgaben durchzuführen sind. Hierzu zählt u. a. die EnEV-Vorgabe zum Austausch alter Heizkessel.

Bei der Bestimmung der Modernisierungsumlage ist zu berücksichtigen, dass Aufwendungen zur Instandhaltung<sup>44</sup> grundsätzlich vom Vermieter zu tragen sind. Maßnahmen, die ohne Reparaturanlass durchgeführt werden und keinerlei Instand-

---

<sup>41</sup> Zur Anrechnungsfähigkeit einzelner Aufwendungen vgl. [38 § 559 Rn. 54–73]. Bei Staffel- und Indexmieten können innerhalb des vertraglich geregelten Mietpreiserhöhungszeitraums keine Modernisierungsumlagen geltend gemacht werden. Eine Ausnahme besteht lediglich bei Indexmietverträgen im Fall einer erzwungenen Umsetzung von Maßnahmen aufgrund gesetzlicher Vorgaben.

<sup>42</sup> Vgl. [BGH, 03.03.2004 – VII ZR 149/03] und [AG Rheine, 22.07.2008 – 14 C 54/07].

<sup>43</sup> Vgl. [BGH, 07.01.2004 – VIII ZR 156/03].

<sup>44</sup> Das Verständnis des Begriffs „Instandhaltung“ orientiert sich im Rahmen dieser Arbeit an der Definition der VDI-Richtlinie 2067 Blatt 1 (2012). Demnach umfasst die Instandhaltung alle Maßnahmen, die zum Erhalt oder der Wiederherstellung des funktionsfähigen Zustandes einer Versorgungsanlage bzw. eines Bauteils erforderlich sind (Inspektion, Wartung/Pflege/Reinigung, Reparatur/Instandsetzung).

setzungsarbeiten beinhalten, stellen reine Modernisierungen dar. Werden im Zuge der Modernisierung jedoch auch Instandsetzungen vorgenommen, sind die dafür erforderlichen Auszahlungen aus der Bemessungsgrundlage zur Ermittlung der Modernisierungsumlage anteilmäßig herauszurechnen. Die korrekte Abgrenzung zwischen Instandsetzungs- und Modernisierungsanteil für eine bestimmte Maßnahme kann durchaus problematisch sein. Eine nachvollziehbar begründete Schätzung der Anteile ist zulässig. Auch eine angemessene Aufwandsverteilung auf die einzelnen Wohneinheiten des Gebäudes kann sich insbesondere bei energetischen Modernisierungen (bspw. Kellerdeckendämmung) schwierig gestalten. Sie kann sich im Einzelfall an den konkreten Vorteilen für die einzelne Wohneinheit orientieren oder eher pauschal, bspw. anhand der Wohnflächenanteile, erfolgen.

Die Modernisierungsumlage wird nach der Maßnahmenumsetzung auf den Bestandsmietpreis vor der Modernisierung dauerhaft aufgeschlagen. Dieser neue Mietpreis kann das anzusetzende Vergleichsmietpreisniveau für entsprechend modernisierten Wohnraum durchaus übersteigen. Wie bereits angesprochen, ist die wirtschaftliche Auswirkung der Modernisierung auf den Mieter dabei weitgehend unerheblich. Die Umlagehöhe wird nicht durch die mit der Maßnahme tatsächlich verbundene Kostenersparnis für ihn begrenzt.<sup>45</sup> Eine Beschränkung kann sich allerdings auf Grundlage des § 5 Wirtschaftsstrafgesetz (WiStG) ergeben, welcher den Mieter vor unangemessen hohen Mietpreisforderungen schützen soll. Voraussetzung ist, dass der Vermieter dabei eine Knappheit an vergleichbarem Wohnraum ausnutzt. Ist dies der Fall, wäre die Modernisierungsumlage so zu begrenzen, dass der neue Mietpreis nicht mehr als 20 % über der anzusetzenden Vergleichsmiete liegt (Mietpreisüberhöhungsgrenze) [37 § 559 Rn. 22]. Zu erwähnen ist noch, dass speziell im Zusammenhang mit energetischen Modernisierungen während der ersten drei Monate der Maßnahmenumsetzung eine ansonsten mögliche Mietpreisminderung aufgrund von Nutzungsbeeinträchtigungen für den Mieter ausgeschlossen ist. Auch hierin ist eine finanzielle Beteiligung des Mieters an der Modernisierung zu sehen.

### 3.2.3 Mietpreisanpassung nach § 558 BGB

Sofern keine vertragliche Vereinbarung zur Mietpreisentwicklung besteht (Staffel- oder Indexmiete), kann der Wohnraumvermieter eine Anpassung des bestehenden Mietpreises an den ortsüblichen Mietpreis verlangen. Eine Mietpreisanpassung ist immer nur bis zum anzusetzenden Vergleichsmietpreis möglich. In dem Zeitraum, in dem der aktuelle Mietpreis die ortsübliche Vergleichsmiete überschreitet, bspw.

---

<sup>45</sup> Vgl. [BGH, 03.03.2004 – VII ZR 149/03].

wegen einer Modernisierungsumlage, ist diese Form der Mietpreiserhöhung somit ausgeschlossen. Liegt der aktuelle Mietpreis dagegen unterhalb des (gegebenenfalls durch eine Modernisierung neu erreichten) Vergleichsmietpreises kann der Vermieter eine entsprechende Erhöhung vom Mieter fordern. Voraussetzung ist, dass der aktuelle Mietpreis mindestens 15 Monate vor der Wirksamkeit der Anpassung nicht auf diesem Wege erhöht wurde (Sperrfrist).<sup>46</sup> Gleichzeitig gilt, dass die Mietpreise im Zeitraum von drei Jahren auf Grundlage von Vergleichsmietpreisanpassungen um maximal 20 % angehoben werden können (Kappungsgrenze). Der anzusetzende Bezugswert ist jeweils die vereinbarte Miete drei Jahre vor dem Wirksamwerden der Mietpreisanpassung [37 § 558 Rn. 66]. Für Gebiete mit angespanntem Wohnungsmarkt aus Mietersicht kann die Kappungsgrenze auch auf 15 % reduziert sein.

Bei der Berechnung der Kappungsgrenze bleiben somit Modernisierungsumlagen unberücksichtigt, die erstmals in dem dreijährigen Bezugszeitraum erhoben werden. Gleiches gilt hinsichtlich der Mietsteigerungssperrfrist. Strebt der Vermieter nach einer Modernisierung ausschließlich eine Erhöhung auf Grundlage des § 558 BGB an, um die Maßnahmenumsetzung bei der Mietpreisbildung zu berücksichtigen, sind bei der Prüfung der Kappungsgrenze die Erhöhungsanteile auszuklammern, die auch über die Modernisierungsumlage hätten geltend gemacht werden können. Die Modernisierungsumlagen werden jedoch Bestandteil des Mietpreises. Somit sind sämtliche Modernisierungsumlagen im Bezugswert der Kappungsgrenze erfasst, die länger als drei Jahre zurückliegen [38 Vorbem. § 558 Rn. 10, 11].

### 3.2.4 Mieterhöhungskombinationen

Im Zusammenhang mit Gebäudemodernisierungen besteht auch die Möglichkeit zur Kombination von Modernisierungsumlage und Mietpreisanpassung bei der Mietpreisbildung.<sup>47</sup> Liegt der aktuelle Mietpreis unterhalb des Vergleichsmietpreises vor der Modernisierung, kann zunächst eine Anpassung auf diesen Vergleichsmietpreis geltend gemacht werden. Die Bestimmungen zur Kappungsgrenze und Sperrfrist sind dabei zu berücksichtigen. Nach Abschluss der Modernisierungsarbeiten wird zusätzlich die Modernisierungsumlage beansprucht. Sperrfrist und Kappungsgrenze sind hierbei unerheblich. Der neue Mietpreis kann auch über dem entsprechend Vergleichsmietpreisniveau für den modernisierten Wohnraum liegen [38 Vorbem. § 558 Rn. 8].

---

<sup>46</sup> Der Begriff „Sperrfrist“ bezieht sich eigentlich auf den möglichen Zeitpunkt des Mieterhöhungsverlangens, welches frühestens ein Jahr nach dem Wirksamwerden der letzten Mieterhöhung geltend gemacht werden kann [37 § 558 Rn. 2–18]. Im Rahmen dieser Arbeit wird er jedoch für den 15-monatigen Zeitraum verwendet, der zwischen dem Wirksamwerden aufeinanderfolgender Erhöhungen einzuhalten ist.

<sup>47</sup> Zur umfassenderen Darstellung der Mieterhöhungsmöglichkeiten vgl. [38 Vorbem. § 558 Rn. 3–9].

Ebenso ist die umgekehrte Erhöhungsreihenfolge im Zusammenhang mit Modernisierungsmaßnahmen möglich. In diesem Fall wird zunächst die Modernisierungumlage nach Abschluss der Arbeiten verlangt. Sperrfrist und Kappungsgrenze sind dabei wiederum irrelevant. Sofern die Summe aus der Modernisierungumlage und dem Mietpreis vor der Modernisierung das erreichte neue Vergleichsmietpreisniveau noch nicht überschreiten, kann direkt eine Mietpreisanpassung bis auf dieses Niveau geltend gemacht werden. Die Regelungen zur Sperrfrist und Kappungsgrenze sind hierbei wieder zu berücksichtigen [38 Vorbem. § 558 Rn. 9].

### 3.2.5 Anrechnung von staatlichen Fördermitteln

Werden zur Maßnahmenfinanzierung staatliche Fördermittel genutzt, sollen die daraus resultierenden Vorteile auch dem Mieter zugutekommen. Die anzusetzenden Förderbeträge zur Mieterentlastung sind unabhängig von der Vorgehensweise bei der Mietpreisbildung zu berücksichtigen [38 § 559a Rn. 1–2].

Im Fall einer Mieterhöhung nach § 559 BGB zählen öffentliche Investitionszuschüsse nicht zu den aufgewendeten Modernisierungsauszahlungen und verringern wie die anteiligen Instandsetzungsaufwendungen direkt die Bemessungsgrundlage für die Modernisierungumlage. Für die Anrechnungspflicht dieser Fördermittel ist ihr Verwendungszweck von Bedeutung. Von Investitionszuschüssen für Instandsetzungen und nicht umlegbaren Modernisierungsaufwand profitiert ausschließlich der Vermieter [38 § 559a Rn. 8]. Insbesondere die Investitionszuschüsse der KfW werden üblicherweise für die Gesamtmaßnahme inklusive anteiliger Instandsetzungsarbeiten gewährt. Vor diesem Hintergrund wäre nur eine anteilige Fördermittelanrechnung entsprechend dem umlagefähigen Modernisierungsanteil der Maßnahmen zugunsten des Mieters vorzunehmen. Werden staatlich geförderte Darlehen mit Zinsverbilligung genutzt, ist die vermiedene jährliche Zinszahlung bei der Mietpreiserhöhung zu berücksichtigen. Die anzurechnende Förderung errechnet sich aus dem anfänglichen Darlehensbetrag sowie der Differenz zwischen dem Marktzinssatz einer entsprechenden erstrangigen Hypothek und dem verbilligten Zinssatz zum Zeitpunkt des Abschlusses der Modernisierungsarbeiten. Um diesen Förderbetrag verringert sich die maximal mögliche Modernisierungumlage, die ohne Inanspruchnahme des zinsverbilligten Darlehens zulässig gewesen wäre.<sup>48</sup>

Die zinsverbilligten Darlehen der KfW können wie die Investitionszuschüsse in der Regel zur Finanzierung der gesamten Modernisierungsmaßnahme herangezogen werden. In der Liste der förderfähigen Aufwendungen sind auch damit verbundene

---

<sup>48</sup> Vgl. hierzu und zur ausführlichen Erläuterung [37 § 559a Rn. 1–13] sowie [38 § 559a Rn. 1–26].

Instandsetzungsarbeiten aufgeführt [160]. Ob sich der anzurechnende Förderbetrag aus einer Zinsverbilligung nur auf die umlagefähigen Modernisierungsanteile der Maßnahmen beschränkt, für die das Darlehen beansprucht wurde, oder ob der gesamte anfängliche Darlehensbetrag inklusive der Aufwendungsanteile für Instandsetzungen zu berücksichtigen ist, wird in der Literatur durchaus widersprüchlich gesehen. Der Gesetzestext nimmt auf eine derartige Differenzierung keinen Bezug sondern gibt als Bemessungsgrundlage zur Ermittlung der Förderhöhe den Anfangsbetrag des Darlehens vor, das für umlagefähige Modernisierungen beansprucht wird [§ 559a Abs. 2 BGB]. Würde ein solches Darlehen jedoch ausschließlich und zweckgebunden für Instandsetzungsarbeiten gewährt werden, welche bei der Mietpreiserhöhung nach § 559 BGB generell unberücksichtigt bleiben müssen, sollten die daraus resultierenden Vorteile auch nur dem Vermieter zugutekommen [38 § 559a Rn. 8]. Vor diesem Hintergrund wird bspw. in [203<sup>S. 57</sup>] und [113<sup>S. 65</sup>] die Ansicht vertreten, dass auch bei den geförderten Darlehen lediglich eine dem umlagefähigen Modernisierungsanteil entsprechende Anrechnung der Zinsverbilligung vorzunehmen ist. Dieser Auffassung wird in der vorliegenden Arbeit gefolgt. Weiterhin wird davon ausgegangen, dass der einmalige Tilgungszuschuss, welcher nach Abschluss der Maßnahmen und Nachweis der Anforderungserfüllung bei einigen KfW-Darlehen gewährt wird, als ein Zuschuss im Sinne des § 559a Abs. 1 BGB anzusehen ist [203<sup>S. 56</sup>]. Dementsprechend wäre eine Anrechnung dieser Förderung im Rahmen der Mietpreisbildung vorzunehmen, welche der Vorgehensweise bei der Inanspruchnahme eines Investitionszuschusses entspricht.

Bei einer Erhöhung nach § 558 BGB sind die Förderungen nicht nur im unmittelbaren zeitlichen Zusammenhang mit der Modernisierungsmaßnahme, sondern auch für zukünftige Mietpreisanpassungen an das Vergleichsmietpreisniveau innerhalb des Förderzeitraums zu berücksichtigen. In diesem Zeitraum ist eine Mietpreiserhöhung auf diesem Wege nur bis zum Vergleichsmietpreis abzüglich der Förderbeträge zulässig. Der anzurechnende Förderbetrag bei der Inanspruchnahme eines zinsverbilligten Darlehens, welcher wie vorab beschrieben zu ermitteln ist, gilt konstant für die Bindungsfrist des verbilligten Zinssatzes (Förderdauer) und ist somit unabhängig von der realen Zinsentwicklung in diesem Zeitraum bei Mietpreisanpassungen zu beachten. Im Falle von Zuschüssen im Sinne des § 559a Abs. 1 BGB sind diese mit 11 % des Zuschusses als Förderbetrag anzusetzen. Die Anrechnungsdauer beträgt 12 Jahre.<sup>49</sup>

---

<sup>49</sup> Vgl. [BGH, 13.06.2012 - VIII ZR 310/11], [37 § 558 Rn. 46–58] sowie [38 § 558 Rn. 200–245].

### 3.2.6 Mietpreis bei Neuvermietung

Bei einer Neuvermietung orientiert sich der (Einstiegs-)Mietpreis in der Regel an den lokalen Marktbedingungen und ist zwischen den Mietvertragsparteien weitgehend frei verhandelbar. Er kann sowohl unter als auch über dem Vergleichsmietpreisniveau liegen. Als gegebenenfalls unzulässig können bislang Einstiegsmietten angesehen werden, die das ortsübliche Vergleichsniveau um mehr als 20 % übersteigen, sofern der Vermieter dabei eine Wohnraumknappheit ausnutzt.<sup>50</sup>

Hat der Vermieter Modernisierungsmaßnahmen durchgeführt, könnte die Miete des vorhergehenden Mietverhältnisses aufgrund einer Modernisierungsumlage über dem Vergleichsmietpreisniveau gelegen haben. Kann bei der Neuvermietung lediglich eine Einstiegsmiette entsprechend dem ortsüblichen Vergleichsmietpreis erreicht werden, würden somit Erträge zur Refinanzierung der Maßnahmen für ihn verloren gehen. Positiv wirkt sich dagegen aus, dass nach einem Mieterwechsel die Anrechnungspflicht von staatlichen Fördermitteln für frühere Modernisierungsmaßnahmen im Rahmen von Mietpreisanpassungen an die ortsübliche Vergleichsmiete für das neue Mietverhältnis erlischt [37 § 558 Rn. 48, § 559a Rn. 3].

### 3.2.7 Betriebskostenverordnung und Heizkostenverordnung

Die Betriebskostenverordnung (BetrKV) und die Heizkostenverordnung (HeizkostenV) werden auf Grundlage des EnEG erlassen. Die BetrKV legt die auf einen Mieter umlegbaren Kosten des laufenden Gebäudebetriebs fest. Für die Energieversorgung und damit für die Modernisierungsplanung eines Vermieters vorrangig relevant sind die Aufwendungen für die Heizungswärme- und Warmwasserbereitstellung. Im Detail handelt es sich hierbei um die Kosten:

- der eingesetzten Energieträger (inklusive der Bereitstellung),
- des Betriebsstroms der Versorgungsanlagen (Hilfsenergie),
- der Energieverbrauchserfassung und der -abrechnung,
- der Messungen nach dem Bundes-Immissionsschutzgesetz sowie
- der Überwachung, Inspektion, Reinigung und Wartung der technischen Anlagen zur Gewährleistung ihrer Betriebssicherheit und -bereitschaft.

Die Umlage von Aufwendungen, die aufgrund von Abnutzung, Alterung und Witterungseinwirkung zur Wiederherstellung des Sollzustandes durch Reparatur bzw. Instandsetzung entstehen, ist dagegen ausgeschlossen. Der Austausch von kleinen

---

<sup>50</sup> Vgl. [§ 5 WiStG]. Auch für die Mietpreisüberhöhung bei der Neuvermietung wird von politischer Seite ab 2015 eine stärkere Beschränkung in angespannten Wohnungsmärkten angestrebt [55].

Verschleißteilen mit geringem Wert wird in der laufenden Rechtsprechung aber mitunter als umlagefähig angesehen. Schließt der Mieter einen eigenen Versorgungsvertrag mit einem externen Energielieferanten ab, bspw. im Falle einer Gas-Etagenheizung, reduzieren sich die Umlagen mindestens auf die letzten beiden Punkte.

Üblicherweise leistet der Mieter monatliche Vorauszahlungen für die Betriebskosten an den Vermieter, über die jährlich abzurechnen ist. Die BetrKV trifft jedoch keine Aussage zur Verteilung der Kostenbestandteile zwischen den Gebäudenutzerparteien. Sofern sie nicht direkt einem einzelnen Nutzer zugeordnet werden können, gilt grundsätzlich die Regelung der Aufteilung nach den Wohnflächenanteilen. Zusätzlich bestimmt die HeizkostenV die Kostenverteilung für den Betrieb zentraler Heizungs- und Warmwasserversorgungsanlagen. Hiernach sind im Regelfall 50-70% der Betriebskosten nach dem gemessenen Verbrauch und der Rest nach dem Verhältnis der genutzten Flächen- oder Raumanteile zu verteilen. Zur Ermittlung der umlagefähigen Wärmeerzeugungskosten von KWK-Anlagen sei an dieser Stelle ergänzend noch auf die VDI-Richtlinie 2077 Blatt 3.1 verwiesen.

### 3.3 Steuerrechtsrahmen

*„Auf wenig ist so sicher Verlass wie auf die rege Gesetzgebung im Steuerrecht [...]“* [79<sup>S.V.</sup>]. Diese Erkenntnis dürfte neben der durch die zahlreichen Sonderregelungen bedingten Vielschichtigkeit und Komplexität der Thematik einer der Hauptgründe sein, warum steuerliche Aspekte bei der Entwicklung von Entscheidungsmodellen in wissenschaftlichen Arbeiten gern ausgeklammert werden. Für eine praxisrelevante ökonomische Bewertung von Modernisierungen von vermieteten Gebäuden sowie für die Bewirtschaftung von KWK- und PV-Anlagen können Steuern aber einen großen Einfluss haben und sollten deshalb auf der gewählten Betrachtungsebene nicht vernachlässigt werden.

Aufgrund der fortlaufenden Variabilität des Steuerrechts können die folgenden Ausführungen nur eine Momentaufnahme aktueller Vorgaben darstellen und beschränken sich auf grundlegende Aspekte (Stand Ende 2014/Anfang 2015). Der Überblick fokussiert auf die relevanten Regelungen des Einkommensteuergesetzes (EStG) und des Umsatzsteuergesetzes (UStG) sowie den Vorgaben des Umsatzsteueranwendungserlasses (UStAE), welche im Rahmen der Gebäude- und Stromanlagenbewirtschaftung tangiert werden können.<sup>51</sup> Die Vorgaben bieten stellenweise noch einen gewissen

---

<sup>51</sup> Vgl. [§§ 2, 7, 7h, 7i, 8, 9, 9b, 10f, 15, 21 EStG], [§§ 2, 3, 4, 9, 10, 15, 15a, 19 UStG] und [Abschnitte 2.5, 3.3, 3.10, 4.12.1, 15.2c UStAE]. Gegenstand der Betrachtung sind die steuerrechtlichen Rahmenbedingungen natürlicher Personen als Wohngebäudeeigentümer und gegebenenfalls Bewirtschafter einer objektinter-

Auslegungs- bzw. Interpretationsspielraum. Aus diesem Grund fließen in die folgende Darstellung auch vorstellbare Sichtweisen und mögliche Auffassungen mit ein. Die Vorgehensweise im konkreten Einzelfall – auch vor dem Hintergrund der laufenden Rechtsprechung und Klarstellungen der Finanzbehörden – kann davon abweichen.

### 3.3.1 Einkommensteuer

Die langfristige Vermietung von Wohnraum zählt zur privaten Vermögensverwaltung. Werden Einkünfte erwirtschaftet, unterliegen diese der Einkommensteuer. Die zu versteuernden Einkünfte werden durch die Gegenüberstellung der Einnahmen und Werbungskosten ermittelt (Überschussrechnung). Zu den Werbungskosten zählt u. a. die Absetzung für Abnutzung (AfA). Im Regelfall sind die mit dem Gebäude im Zusammenhang stehenden Herstellungs- bzw. Anschaffungskosten mit 2% pro Jahr abzuschreiben.<sup>52</sup> Dabei ist unerheblich, ob alle Gebäudekomponenten komplett über die angesetzte Nutzungsdauer von 50 Jahren auch verwendet werden können. Sind bspw. einzelne Bauteile oder technische Anlagen während der Gebäudenutzungsdauer zu ersetzen, zählen diese Auszahlungen zu den Erhaltungsaufwendungen und sind dann in der Regel sofort in voller Höhe als Werbungskosten erklärbar. Wird zur Maßnahmenfinanzierung Fremdkapital herangezogen, stellen die Zinszahlungen ebenfalls Werbungskosten dar.

Zu einem Erhaltungsaufwand können nur Investitionen in Anlagen und Bauteile führen, die bereits vorhandene Gebäudekomponenten betreffen, ohne dass eine Funktionserweiterung erfolgt (bspw. das Anbringen einer Außenwanddämmung), oder solche, die vorhandene Bauteile bzw. deren Funktion ersetzen (bspw. der Austausch des Hauptwärmeerzeugers). Instandsetzungsmaßnahmen und die damit einhergehende Modernisierung stellen damit im Regelfall Erhaltungsaufwand dar. Der zeitliche Zusammenfall der Maßnahmen oder die Höhe der Auszahlungen ist dabei zunächst unerheblich. Davon abweichend werden Auszahlungen, die mit der Erweiterung der Bausubstanz, neuen Funktionen oder mit einer wesentlichen Verbesserung des Wirtschaftsgutes „Gebäude“ – dem sogenannten Standardsprung – einhergehen als nachträglicher Herstellungsaufwand betrachtet [59].

Ein Standardsprung liegt vor, wenn innerhalb von 5 Jahren mindestens drei der vier zentralen Ausstattungsmerkmale Fenster, Heizungs-, Sanitär- und Elektroinstallation

---

nen Stromerzeugungsanlage. Beleuchtet werden lediglich die Regelungen für nach 2014 neu errichtete Stromerzeugungsanlagen. Für Bestandsanlagen gelten teilweise abweichende Regelungen in Abhängigkeit des Inbetriebnahmezeitpunkts und der damit verbundenen Förderrahmenbedingungen.

<sup>52</sup> Neben dem Regelfall von 2 % pro Jahr gelten Sonderregelungen u. a. für Gebäude in Sanierungsgebieten und städtischen Entwicklungsbereichen, für Baudenkmäler und Wohnungen mit Sozialbindungen.

durch Sanierungsmaßnahmen von einem sehr einfachen auf einen mittleren oder von einem einfachen bzw. mittleren auf einen sehr anspruchsvollen Standard gehoben werden [59]. Der Standardsprung kann unter Umständen nicht nur aus der Ausstattungsqualitätsänderung des Gebäudes abgeleitet werden. Gegebenenfalls wird auch eine Modernisierung, die zu einer wesentlichen Mietpreissteigerung führt, von den Finanzbehörden als Standardsprung interpretiert. Eine weitere Abweichung vom Regelfall „Erhaltungsaufwand“ kann dadurch entstehen, dass die Instandsetzung bzw. Modernisierung zeitnah zum Kauf des Gebäudes erfolgt. Die Auszahlungen für die Maßnahmenumsetzung werden als anschaffungsnahe Herstellkosten gesehen, wenn sie 15 % des Anschaffungswertes in den ersten drei Jahren nach dem Erwerb übersteigen [59].

Im Gegensatz zur Immobilienbewirtschaftung sind Steuern für eine Modernisierungsentscheidung im Bereich des selbst genutzten Wohnungseigentums – zumindest nach derzeitiger Gesetzeslage – kaum von Bedeutung.<sup>53</sup> In der jüngeren Vergangenheit wurden zwar Initiativen [52] ergriffen, welche auch für Eigennutzer die Möglichkeit bieten sollten, Modernisierungsaufwendungen steuerlich geltend zu machen. Ein entsprechender Gesetzentwurf ließ sich bislang jedoch nicht durchsetzen [50/51].

Die Bewirtschaftung einer PV- oder KWK-Anlage ist sowohl für einen Vermieter als auch für einen selbstnutzenden Gebäudeeigentümer aus steuerlicher Sicht gesondert zu behandeln. Der aus dem Betrieb einer solchen Anlage resultierende Gewinn (bzw. Verlust) zählt zu den Einkünften aus Gewerbebetrieb.<sup>54</sup> Der Gewinn kann durch die Gegenüberstellung der Betriebseinnahmen und Betriebsausgaben (Einnahmenüberschussrechnung) ermittelt werden. Zu den Einnahmen zählen u. a. die Vergütungen aus der Netzeinspeisung bzw. dem objektinternen oder objektexternen Verkauf des erzeugten Stroms an Dritte sowie staatliche Zuschläge und Zuschüsse. Auch die Entnahmen eines Gebäudeeigennutzers für seinen privaten Stromverbrauch sind als fiktive Einnahme anzusetzen. Letzterem liegt der Gedanke zugrunde, die Gewinnminderung der damit verbundenen Aufwendungen adäquat zu neutralisieren. Als Bemessungsgrundlage für diese Entnahme könnten somit die Selbstkosten herangezogen werden. Vorstellbar wäre aber auch der voraussichtlich am Markt erzielbare Verkaufspreis [25]. Für die Wärmenutzung aus KWK-Anlagen sollte entsprechendes gelten, wobei hier aufgrund der üblicherweise fehlenden gebäudeexternen Vermarktungsmöglichkeit die Selbstkosten zu betrachten wären.

---

<sup>53</sup> Eine Ausnahme stellen denkmalgeschützte Gebäude dar.

<sup>54</sup> Damit ist der Stromanlagenbetrieb grundsätzlich auch gewerbesteuerpflichtig. Sofern der Gewinn aus allen gewerblichen Tätigkeiten des Anlagenbetreibers (als natürliche Person oder Personengesellschaft) nicht mehr als 24.500 € pro Jahr beträgt, fällt jedoch keine Gewerbesteuer an. Vgl. Freibetrag gemäß § 11 Gewerbesteuergesetz (GewStG).

Auf der Seite der Betriebsausgaben ist – u. a. neben den Aufwendungen für Instandhaltung, Finanzierung und gegebenenfalls für den Brennstoffbezug – die AfA zu berücksichtigen. Im Gegensatz zu Anlagen, die ausschließlich zur zweckgemäßen Nutzung des Gebäudes benötigt werden (bspw. ein Heizkessel) und als unselbständige Gebäudebestandteile anzusehen sind, gelten stromerzeugende Anlagen in der Regel als selbständige bewegliche Wirtschaftsgüter.<sup>55</sup> Die Zeiträume der im Normalfall linearen steuerlichen Abschreibung betragen für eine KWK-Anlage 10 Jahre und für eine PV-Anlage 20 Jahre [41]. Werden staatliche Investitionszuschüsse in Anspruch genommen, sind diese als Betriebseinnahme zu berücksichtigen und die AfA ist aus den gesamten Herstellungs-/Anschaffungskosten zu ermitteln. Alternativ können die Herstellungs-/Anschaffungskosten auch um den Investitionszuschuss verringert werden, welcher dann über den Weg der geringeren AfA versteuert wird [25]. Gleichermaßen sollten staatliche Förderungen in Form von Tilgungszuschüssen Berücksichtigung finden [182].

### 3.3.2 Umsatzsteuer

Wer eine stromerzeugende Anlage betreibt und regelmäßig elektrische Energie in das allgemeine Versorgungsnetz einspeist, ist unabhängig von der Höhe der erzielten Einnahmen ein Unternehmer im Sinne des UStG.<sup>56</sup> Die Umsätze aus dem Betrieb einer KWK- oder PV-Anlage unterliegen grundsätzlich der Umsatzsteuer. Im Allgemeinen sollte für einen Betreiber von PV- und KWK-Anlagen in Wohngebäuden die Kleinunternehmerregelung greifen.<sup>57</sup> In diesem Fall bleiben die Umsätze steuerfrei und ein Vorsteuerabzug aus den Eingangsrechnungen ist nicht möglich. Aus letzterem Grund kann es für den Anlagenbetreiber vorteilhaft sein – vor allem hinsichtlich der Vorsteuerabzugsmöglichkeit im Zusammenhang mit dem Erwerb der Anlage – zur Regelbesteuerung zu optieren [25].

Im Fall der Regelbesteuerung ist zunächst die Zuordnung der Anlage zum Unternehmensvermögen von Bedeutung. Wird die Anlage ausschließlich für unternehmerische Zwecke genutzt, ist die Anlage vollständig dem Unternehmensvermögen zuzuordnen. Hierzu zählt die Energieeinspeisung in öffentliche Netze bzw. die Energielieferung an Dritte. Auch die Versorgung des vermieteten Wohneigentums des Anlagenbetreibers mit Allgemeinstrom (allgemeine Beleuchtung etc.), Antriebs- und Hilfsenergien oder KWK-Wärme sowie die Energielieferungen für die private Stromnutzung seiner Mieter stellt – wie die Vermietung selbst – eine unternehmerische Tätigkeit dar. Wird

---

<sup>55</sup> Bezüglich KWK-Anlagen vgl. [OFD Niedersachsen 15.12.2010, S 2240 - 186 - St 221/St 222].

<sup>56</sup> Vgl. [BFH, 18.12.2008 - V R 80/07] und [EuGH, 20.06.2013 - C-219/12].

<sup>57</sup> Sofern die Umsätze im aktuellen Jahr 50.000 € und im Vorjahr 17.500 € nicht übersteigen.

die erzeugte Energie zusätzlich unternehmensfremd (privat) durch den Anlagenbetreiber zur Deckung seines eigenen Strom- und/oder Wärmebedarfs genutzt, besteht dagegen ein Zuordnungswahlrecht. Die Zuordnung der Anlage zum Unternehmen kann unterbleiben oder vollständig erfolgen. Auch eine dem unternehmerischen Nutzungsumfang entsprechende teilweise Zuordnung ist möglich. In den letzten beiden Fällen muss die unternehmerische Nutzung jedoch mindestens 10 % betragen. Die Zuordnungsentscheidung muss zeitnah zur Anschaffung der Anlage erfolgen.

Der Vorsteuerabzug für die Aufwendungen zur Anschaffung, zum Betrieb und zur Instandhaltung der Anlage ist maximal in Höhe des unternehmerischen Zuordnungsanteils möglich. Dementsprechend wird der nichtunternehmerische Anteil auch nicht der Umsatzbesteuerung unterworfen. Wird die Anlage vollständig dem Unternehmen zugeordnet, kann der volle Vorsteuerabzug auch für die Aufwendungsanteile geltend gemacht werden, die der Selbstversorgung des Anlagenbetreibers zuzurechnen sind. Diese private Energieinanspruchnahme unterliegt dann der Wertabgabenbesteuerung (unentgeltliche Wertabgabe – im Folgenden auch Privatentnahme). Wurde die Anlage nur teilweise dem Unternehmen zugeordnet und übersteigt später der tatsächliche Eigenversorgungsanteil des Anlagenbetreibers den nichtunternehmerischen Anteil, wird diese zusätzliche private Nutzung dann ebenfalls der Wertabgabenbesteuerung unterworfen. Eine nachträgliche Korrektur der Vorsteuerabzugsmöglichkeiten zugunsten des Anlagenbetreibers ist dagegen ausgeschlossen.

Als Bemessungsgrundlage für die unentgeltliche Wertabgabe von PV-Strom ist der Einkaufspreis inklusive Grundgebühren des Reststrombezugs<sup>58</sup> maßgebend. Für die Privatentnahme von KWK-Wärme ist ebenso der fiktive Einkaufspreis für eine alternative Wärmeversorgung (bspw. der Gaspreis für einen vorhandenen Spitzenlasterzeuger oder der örtliche Fernwärmepreis) anzusetzen, sofern diese auch tatsächlich möglich wäre. Ist ein solcher Preis nicht ermittelbar, stellen die anteiligen Selbstkosten der Wärmeerzeugung (für Anlagenanschaffung, Energieträgereinsatz, Instandhaltung, Finanzierung etc.) die Bemessungsgrundlage dar.

Da der objektintern verbrauchte KWK-Strom staatlich gefördert wird, ist bei dieser Versorgungsoption eine besondere Vorgabe zu beachten.<sup>59</sup> Diese gilt für die Eigenversorgung des Anlagenbetreibers ebenso wie für die Stromlieferungen an eigene Mieter

---

<sup>58</sup> Genutzte Strommengen, die nicht aus den Eigenanlagen gedeckt und von einem anderen Versorger bezogen werden. Existiert kein Liefervertrag für eine Reststromversorgung sind die Preise des örtlichen Grundversorgers anzusetzen.

<sup>59</sup> Diese Vorgabe gilt generell für Stromerzeugungsanlagen, bei denen eine staatliche Förderung auf Grundlage des EEG oder KWKG für den objektintern erzeugten und verbrauchten Stroms gewährt wird. Ist dies nicht der Fall, sollten die hier dargestellten Regelungen für den objektintern verbrauchten PV-Strom (aus Anlagen, die nach März 2012 errichtet wurden) entsprechend gelten, da dieser nicht gefördert wird.

und sonstige Dritte im Gebäude. Die Vorgabe besteht darin, dass dieser KWK-Strom zunächst als an den Netzbetreiber geliefert anzusehen ist, in dessen Netz die Anlage eingespeist. Anschließend erfolgt die Rücklieferung vom Netzbetreiber an den Anlagenbetreiber. Im Rahmen dieser sogenannten kaufmännisch-bilanziellen Einspeisung wird die Umsatzsteuer erhoben. Für die fiktive Lieferung an den Netzbetreiber erhält der Anlagenbetreiber die Umsatzsteuer, welche auf Grundlage des mittleren EEX-Grundlaststrompreises des vorgelagerten Quartals zuzüglich der vermiedenen Netznutzungsentgelte und des KWK-Zuschlags bemessen wird und durch ihn abzuführen ist. Für die fiktive Rücklieferung zahlt der Anlagenbetreiber die Umsatzsteuer an den Netzbetreiber. Die Bemessungsgrundlage für diese Rücklieferung entspricht der Bemessungsgrundlage für die Lieferung an den Netzbetreiber abzüglich des KWK-Zuschlags.

Für die Möglichkeiten zum Vorsteuerabzug im Rahmen der Regelbesteuerung ist auch die Erwirtschaftung von umsatzsteuerpflichtigen Umsätzen von Bedeutung. In diesem Zusammenhang ist zu berücksichtigen, dass Einkünfte aus der Wohnraumvermietung grundsätzlich von der Umsatzsteuer befreit sind und auch befreit bleiben müssen. Dementsprechend kann für die dazugehörigen Aufwendungen auch kein Vorsteuerabzug geltend gemacht werden. Somit ist zu klären, ob es sich bei der Strombereitstellung für das vermietete Eigentum des Anlagenbetreibers um eine Nebenleistung zur Hauptleistung „Vermietung“ oder um eine eigenständige Hauptleistung handelt. Ersteres sollte grundsätzlich für die Bereitstellung elektrischer Antriebs- und Hilfsenergie zur Wärmerversorgung sowie zur Deckung des allgemeinen Gebäudestrombedarfs gelten. Auch die Stromlieferung an die eigenen Mieter zur Deckung ihres privaten Bedarfs kann in der Regel als Nebenleistung angesehen werden. In diesem Fall teilen die Einkünfte aus der Strombereitstellung das steuerliche Schicksal der Haupteinkünfte aus der Vermietung und sind umsatzsteuerfrei. Entsprechend kann für die Aufwendungen, die diesem Nutzungsanteil der Anlage zuzurechnen sind, auch kein Vorsteuerabzug geltend gemacht werden. Vorstellbar wäre aber auch, dass zumindest die Stromlieferung an die eigenen Mieter zur Deckung ihres privaten Bedarfs vor dem Hintergrund der freien Lieferantwahl und eines separat abzuschließenden Liefervertrages als eigenständige Hauptleistung angesehen werden kann. In diesem Fall wäre der vereinbarte Lieferpreis Bemessungsgrundlage für die Umsatzsteuer. Für die entsprechenden Vorleistungen inklusive des Reststrombezugs könnte der Vorsteuerabzug dann geltend gemacht werden.



## Kapitel 4

### Vorüberlegungen zur Modellentwicklung

Ein wesentlicher Nutzen von Modellen ist die Hilfestellung bei der Erfassung, Darstellung und Handhabung komplexer realer Wirkungszusammenhänge [23<sup>s. VII</sup>]. Diese Funktion stellt auch die Beweggründe für die vorgesehene Modellentwicklung und -anwendung im Rahmen dieser Arbeit dar. Um eine Einordnung innerhalb des heterogenen Modellverständnisses in Wissenschaft und Praxis zu erleichtern, soll das zu erarbeitende Analyseinstrument zunächst anhand der von *STACHOWIAK* [245<sup>s. 131 f.</sup>] benannten Hauptmerkmale des allgemeinen Modellbegriffs charakterisiert werden.

Betrachtet wird die Entscheidungssituation bei der Planung und Gestaltung von Modernisierungsmaßnahmen in Wohngebäuden (Abbildungsmerkmal). Adressaten des Modells sind die Gebäudeeigentümer als Initiatoren, Investoren und gegebenenfalls Finanziers der Maßnahmen. Für einen Investor ist der erwartete Zielerreichungsbeitrag der Investition ausschlaggebend für die Entscheidung zur Realisation [157<sup>s. 8</sup>]. Der Zweck des Modells ist die Bereitstellung hierfür geeigneter Informationen (pragmatisches Merkmal). Die Modellierung beschränkt sich auf wesentliche Entscheidungsgrößen mit ihren relevanten Attributen sowie deren Beziehungsstruktur (Verkürzungsmerkmal), ohne essenzielle Einflussfaktoren und Interdependenzen zu vernachlässigen.

Diese grundlegende Charakterisierung bildet den Rahmen für die methodischen Vorüberlegungen zur Modellentwicklung, welche Gegenstand dieses Kapitels sind. Ausgangspunkt für die Erarbeitung eines entscheidungsvorbereitenden Planungsinstrumentes ist die Erfassung und Abgrenzung der betrachteten Entscheidungssituation. Diese wird im Unterkapitel 4.1 hinsichtlich ihrer einzelnen Aspekte beleuchtet. Anschließend werden im Unterkapitel 4.2<sup>s. 67</sup> existierende Bewertungsansätze vorgestellt, welche die Entscheidungssituation zur energetischen Gebäudegestaltung aus einem umfassenden techno-ökonomischem Blickwinkel analysieren. Ziel ist das Aufzeigen der methodischen Lücke in der bestehenden Modelllandschaft, die mit dem zu entwickelnden Modell geschlossen werden soll.

Die sich daran anschließenden Unterkapitel widmen sich der methodischen Diskussion und der Auswahl von geeigneten Methoden für das zu entwickelnde Planungsinstrument. Ausgangspunkt bildet die Erstellung eines konkretisierten Anforderungsprofils für das zu entwickelnde Entscheidungsmodell im Unterkapitel 4.3<sup>S.78</sup>.

Aus dem bereits in der Arbeitszielstellung formulierten Anspruch, die aus wirtschaftlicher Sicht beste Handlungsalternative bestimmen zu wollen, leiteten sich die notwendigen Segmente des neuen Analyseansatzes ab [20<sup>S.13 ff.</sup>]. Aufgrund der engen Verknüpfung eines jeden Entscheidungsprozesses mit den Interessen und Prämissen des Entscheidungsträgers, bedarf es zunächst einer klaren Bestimmung der Eigentümerziele und des daraus resultierenden Maßstabs, anhand dessen die Entscheidung zur Umsetzung von Modernisierungsmaßnahmen im Modell orientiert werden soll. Der unbestimmte und recht dehnbare Begriff „wirtschaftlich“ soll und kann hierfür lediglich eine grobe Richtung vorgeben.

Als zweite Modellkomponente ist die Abbildung des Handlungsspielraums erforderlich, welcher die einzelnen Optionen des Eigentümers zur Gebäudemodernisierung umfasst. Hierfür ist eine Methode zu eruieren, mit deren Hilfe seine Möglichkeiten adäquat modelliert werden können. Aus der Kombination einzelner Handlungsoptionen ergeben sich die Handlungsalternativen.<sup>60</sup>

Die Handlungsalternativen sind einem Bewertungsverfahren zu unterziehen, welches den dritten Modellbestandteil darstellt. Das Bewertungsverfahren erfasst die ökonomischen Konsequenzen der einzelnen Alternativen und ist dafür verantwortlich, ihren Zielerreichungsbeitrag unter Berücksichtigung der durch den Entscheidungsträger nicht zu beeinflussenden Rahmenbedingungen zu bestimmen. Darauf aufbauend wird eine Methode benötigt, mit der letztendlich die vorteilhafteste Alternative bezüglich der Zielsetzungen des Eigentümers als Investor ermittelt werden kann.

Die einzelnen Modellsegmente sind aufeinander abzustimmen. Dementsprechend greifen auch die Vorüberlegungen zu ihnen ineinander. Im Unterkapitel 4.4<sup>S.81</sup> erfolgt zunächst die notwendige operationale Definition der betrachteten Zielinhalte und Zielerreichungsvorschriften [172<sup>S.11</sup>] des Gebäudeeigentümers. Anschließend widmet sich Unterkapitel 4.5<sup>S.85</sup> den Überlegungen zur Modellierung und Analyse der Modernisierungsentscheidung. In diesem Rahmen werden die Festlegungen zur Abbildungsmethode im Zusammenspiel mit der Verfahrenswahl zur Bestimmung der vorteilhaftesten Handlungsalternative getroffen. Im Unterkapitel 4.6<sup>S.97</sup> wird eine geeignete Bewertungsmethode identifiziert.

---

<sup>60</sup> Als „Alternative“ werden im Folgenden zulässige Kombinationen von einzelnen Handlungsoptionen verstanden, welche dem Prinzip der vollkommenen Alternativenstellung entsprechen [20<sup>S.16/277</sup><sup>S.21</sup>].

Wie bei vielen Entscheidungen, deren reale Konsequenzen sich erst in ausgedehnten Zeiträumen nach ihrer Umsetzung vollständig zeigen können, bestehen für die Planung von energetischen Gebäudemodernisierungen verschiedene Unsicherheiten hinsichtlich der Entwicklung entscheidungsrelevanter Rahmenbedingungen und Einflussgrößen. Die Diskussion zur Berücksichtigung dieser Unsicherheiten ist Gegenstand des Unterkapitels 4.7<sup>s. 110</sup>.

Die Vorüberlegungen zur Modellentwicklung enden mit einer zusammenfassenden methodischen Einordnung des zu erstellenden Analyseinstrumentes in die bestehende Modelllandschaft, die auf eine Entscheidungsunterstützung bei der energetischen Gebäudeauslegung unter wirtschaftlichen Gesichtspunkten abzielt.

## **4.1 Die Entscheidungssituation „Wohngebäudemodernisierung“**

Ziel dieses Unterkapitels ist die Charakterisierung der Entscheidungssituation „Wohngebäudemodernisierung“. Besonderes Augenmerk wird auf die bestehenden (Inter-)Dependenzen zwischen den einzelnen Handlungsoptionen und den Rahmenbedingungen des Entscheidungsträgers gelegt. Die betrachtete Entscheidungssituation lässt sich grob in einen technischen und einen ökonomischen Aktionsraum gliedern, welche jeweils mehrere zu treffende Entscheidungen umfassen. Eine weitere Dimension stellt die Frage nach dem Umsetzungszeitpunkt von Modernisierungsmaßnahmen dar. Die bestehenden Unsicherheiten hinsichtlich der Entwicklung entscheidungsrelevanter Rahmenbedingungen und Einflussgrößen bilden einen vierten Aspekt der Modernisierungsplanung.

### **4.1.1 Technische Aspekte der Entscheidungssituation**

Bei der Planung von Modernisierungsmaßnahmen erstreckt sich der Einflussbereich des Gebäudeeigentümers über alle Stufen des hausinternen Versorgungssystems. Hierfür bieten sich ihm technische Maßnahmenoptionen einerseits auf der Energiebereitstellungsseite und andererseits auf der Energienutzungsseite.<sup>61</sup> Die Maßnahmenoptionen umfassen den Einbau neuer und/oder den Rückbau bestehender Anlagen und Bauteile, wie bspw. die Installation einer neuen Wärmeerzeugungsanlage, das Anbringen einer Außenwanddämmung oder den Ausbau eines vorhandenen Wärme-

---

<sup>61</sup> Die Energiebereitstellungsseite umfasst die Energieübernahme an der Gebäudegrenze sowie die objektinterne Energieerzeugung, -speicherung, -verteilung und -übergabe. Zur Nutzungsseite zählen alle technischen Maßnahmen zur Beeinflussung des Nutzenergiebedarfs (vgl. Abbildung 5<sup>s. 18</sup>).

speichers. Bei der Maßnahmenplanung sind gesetzliche Mindestanforderungen zu berücksichtigen. Gleichzeitig könnte sich für ihn aber auch die Durchführung von Maßnahmen als vorteilhaft erweisen, deren Wirkung über die gesetzlichen Vorgaben hinausreicht. Die Kombination einzelner Maßnahmenoptionen wird im Folgenden als *Maßnahmenbündel* bezeichnet.

Bei der Zusammenstellung des Maßnahmenbündels sind die Interdependenzen zwischen der Auslegung der Wärmeerzeugungsanlagen und der energetischen Gestaltung der Gebäudehülle sowie der Warmwasserbereitstellung zu beachten. Erstere müssen eine Abgabeleistung aufweisen, mit der jederzeit eine ausreichende Wärmeversorgung gewährleistet werden kann. Hierbei ist insbesondere der Einfluss der energetischen Hüllflächengestaltung auf den Heizlastverlauf zu berücksichtigen, welcher sich auf die Einsatzdauer und die zeitabhängige Auslastung der Wärmebereitstellungsanlagen auswirkt. Entsprechende Wechselwirkungen bestehen auch zwischen den einzelnen Versorgungsanlagen auf der Bereitstellungsseite falls mehrere Energieerzeugungsanlagen in Kombination zur Deckung des Nutzenergiebedarfs eingesetzt werden. Die Einsatzplanung von Anlagen mit modulierbarem bzw. unterbrechbarem Betrieb beinhaltet somit wesentliche Entscheidungen, die im Regelfall mithilfe einer vorzugebenden Systemsteuerung automatisiert getroffen werden. Darüber hinaus bietet die Installation von Energiespeichern die Möglichkeit, die Energieerzeugung in einem beschränkten Umfang von der Energienutzung zeitlich zu entkoppeln. Die Auslegung der Speicheranlagen bietet somit einen zusätzlichen Freiheitsgrad bei der leistungsmäßigen Auslegung und Einsatzplanung der Erzeugungsanlagen, womit sie vor allem für Technologien mit nur bedingt steuerbarer Energieerzeugung oder mit Kraft-Wärme-Kopplung bedeutsam ist.

Die Zusammenstellung des Maßnahmenbündels bestimmt in Verbindung mit der Anlageneinsatzplanung den zeitabhängigen Bedarf von Nutz- und Hilfsenergie, die internen Bereitstellungsverluste sowie den daraus resultierenden Endenergiebedarf des Gebäudes. Gleichzeitig hat sie einen Einfluss auf die zukünftigen Zahlungsströme des Eigentümers. Damit erfolgt die Überleitung zu den ökonomischen Aspekten der Entscheidungssituation.

#### **4.1.2 Ökonomische Aspekte der Entscheidungssituation**

Ein wesentlicher ökonomischer Aspekt der Modernisierungsplanung ist die Entscheidung zur Maßnahmenfinanzierung. Der Handlungsspielraum umfasst den Einsatz von Eigenmitteln und verschiedene Möglichkeiten zur Aufnahme von Fremdkapital. Letzteres ist von staatlicher Seite Ansatzpunkt für Förderinstrumente in Form von Zuschüssen und zinsverbilligten Darlehen der KfW-Bankengruppe. Die Festlegung der

Zuschuss- und Kreditkonditionen einzelner Förderinstrumente ist in der Regel abhängig von zu erfüllenden Mindestanforderungen bei der Modernisierung. Für die Inanspruchnahme dieser Finanzierungsmöglichkeiten besteht damit eine Dependenz zum Maßnahmenbündel, welches die geforderten energetischen Standards für einzelne Bauteile bzw. für das gesamte Gebäude erfüllen muss. Tendenziell bedingt ein höherer Modernisierungsgrad auch höhere Anfangsauszahlungen, gleichzeitig verbessern sich aber die Zuschuss- und Kreditkonditionen für den Eigentümer. Sowohl die Verfügbarkeit von Eigen- als auch von Fremdmitteln kann Beschränkungen unterliegen, die einerseits abhängig sind vom Budget, das der Eigentümer selbst bereitstellen kann (bzw. will) und andererseits von seiner Bonität.

Für die wirtschaftliche Bewertung einer Modernisierung hat die Eigentümer-Nutzer-Relation einen wesentlichen Einfluss. Im Falle des Eigennutzers misst sich die Vorteilhaftigkeit der Investition anhand der erreichten Energiekosteneinsparung. Für den Gebäudebewirtschafter muss sich die Investition dagegen aus den Mieteinkünften refinanzieren. Der Eigentümer hat hier die Möglichkeit, die Anfangsauszahlungen zur Maßnahmenumsetzung auf die Bestandsmieter umzulegen. Dadurch könnten allerdings Mieterhöhungen im Folgezeitraum unterbunden werden, die im Rahmen der Anpassung an das ortsübliche Vergleichsmietpreisniveau auch ohne die Modernisierung möglich gewesen wären. Da bei der Ermittlung des Vergleichsmietpreises die energetische Ausstattung bzw. Beschaffenheit des Gebäudes als Differenzierungskriterium zu berücksichtigen ist, können sich aber auch langfristig zusätzliche Mieteinnahmen gegenüber dem Gebäudeausgangszustand aus den bestehenden Mietverhältnissen ergeben. Für eine Neuvermietung nach der Modernisierung ist der erzielbare Marktmietpreis maßgebend. Dieser orientiert sich ebenfalls am Vergleichsmietpreisniveau und kann sowohl über als auch unter den Bestandsmieten (inkl. einer Modernisierungsumlage) liegen. Auch hier besteht somit eine Interdependenz zum Maßnahmenbündel. Eine weitere Wechselwirkung besteht zwischen der Mietpreisbildung für die Bestandsmietverhältnisse und der Inanspruchnahme staatlicher Fördermittel. Durch die Förderung reduziert sich einerseits die maximal mögliche Modernisierungsumlage. Andererseits schmälert sie auch die Möglichkeiten zur Anpassung der Mieten an das ortsübliche Vergleichsmietniveau während des Förderzeitraums.

Neben den rein wärmebezogenen Maßnahmen kann der Gebäudeeigentümer auch die Investition in eine PV- oder KWK-Anlage erwägen. In diesem Fall obliegt ihm die Entscheidung, sich teilweise selbst mit elektrischer Energie zu versorgen und/oder als Energielieferant für Dritte aufzutreten. Für die gebäudeinterne Stromversorgung hat der Eigentümer als Anlagenbetreiber den Versorgungspreis mit den Abnehmern zu vereinbaren. Die nicht vor Ort genutzte elektrische Energie wird entweder außerhalb des Objektes direkt vermarktet oder gegen ein Entgelt ins öffentliche Netz eingespeist.

Sofern mit dem Gebäude oder durch den Betrieb einer stromerzeugenden Anlage Erträge erwirtschaftet werden, können Steuern auf die Investitions- und Finanzierungsentscheidung großen Einfluss haben. So führen Fremdkapitalzinsen ebenso zu einem steuermindernden Aufwand, wie die Anfangsauszahlungen der Modernisierungsinvestitionen. Letztere können in der Regel als Erhaltungsaufwand geltend gemacht werden und sind im Jahr der Maßnahmenumsetzung in voller Höhe ansetzbar. Werden innerhalb von fünf Jahren umfassende Modernisierungsarbeiten am Gebäude durchgeführt – gegebenenfalls einhergehend mit einer deutlichen Steigerung der Mietpreise – können die Maßnahmen durch die Finanzbehörden dennoch als Herstellungsaufwand interpretiert werden. Dies hat zur Folge, dass die Modernisierungen linear über die Standard- bzw. Restnutzungsdauer des Gebäudes abgeschrieben werden müssen. Letzteres gilt grundsätzlich für Maßnahmen, die neue Gebäudefunktionen bereitstellen.

### 4.1.3 Zeitlicher Aspekt der Entscheidungssituation

In den beiden vorangegangenen Abschnitten werden sowohl die technischen als auch die ökonomischen Aspekte der Entscheidungssituation mit den bestehen Wechselwirkungen erörtert. Außen vor blieb bislang die Frage nach dem Umsetzungszeitpunkt der Modernisierung. Diese Frage ist irrelevant, wenn ein einzelner Zeitpunkt zur Durchführung bereits festgelegt ist und die betrachtete Entscheidungssituation lediglich die Maßnahmenauswahl und die Bestimmung der ökonomischen Entscheidungsgrößen beinhaltet. Sie wird aber dann relevant, wenn der Planungszeitraum mehrere mögliche Umsetzungszeitpunkte aufweist.<sup>62</sup> Daraus ergibt sich ein zusätzlicher Freiheitsgrad für die betrachtete Entscheidungssituation.

Oftmals erfolgt die Umsetzung von Gebäudemodernisierungen im Zusammenhang mit erforderlichen Instandsetzungsmaßnahmen, die aufgrund von Alterung und Verschleiß turnusmäßig durchzuführen sind. Die einzelnen Anlagen und Bauteile weisen unterschiedliche technische Nutzungsdauern auf, sodass bei einem notwendigen Ersatz eines Wärmeerzeugers nicht unbedingt auch Maßnahmen an der Gebäudehülle erforderlich sein müssen. Mit Ausrichtung an der technischen Funktionsfähigkeit einzelner Gebäudekomponenten würde sich die Durchführung von Modernisierungsmaßnahmen auf verschiedene Zeitpunkte verteilen. Hierbei wirken sich die in den vorangegangenen Abschnitten beschriebenen techno-ökonomischen Abhängigkeiten

---

<sup>62</sup> Der Planungszeitraum als der Zeitraum, für den einzelne Handlungen zu bestimmen sind und für den die Handlungskonsequenzen betrachtet werden, ist vollständig im vorgesehenen Modell abzubilden. Die Begriffe „Betrachtungszeitraum“ bzw. „Analysezeitraum“ (des Modells) werden deshalb im Folgenden synonym zum Begriff „Planungszeitraum“ verwendet.

über mehrere Modernisierungszeitpunkte hinweg aus, d. h. die Handlungsspielräume und die Rahmenbedingungen späterer Umsetzungszeitpunkte sind von der Entscheidung zu den früheren Umsetzungszeitpunkten abhängig.

Die Entscheidung zum Modernisierungszeitpunkt lässt sich allerdings kaum aus der pauschalen Betrachtung üblicher Nutzungsdauern ableiten. Einerseits stellen diese Zeitspannen lediglich einen groben Richtwert dar. Die reale Nutzungsdauer einzelner Komponenten ist dagegen von vielen gebäudespezifischen Faktoren (Standort, Nutzung, Nutzerverhalten etc.) abhängig. Auch verlieren sie in der Regel nicht abrupt ihre volle Funktionalität, da Alterung und Verschleiß schleichende Prozesse darstellen und zusätzlich die Möglichkeit besteht, durch kleine Ausbesserungsmaßnahmen bzw. Reparaturen ihre Funktionsfähigkeit über den technischen Nutzungsdauerrichtwert hinaus erheblich zu verlängern. Andererseits könnte aus ökonomischer Sicht aber auch die vorzeitige Erneuerung einzelner Komponenten vorteilhaft sein. Vor allem im Mietbereich ergeben sich nicht selten Modernisierungszwänge durch die Konkurrenzsituation im Mietmarkt des Gebäudestandorts, welche die Notwendigkeit zur funktionalen Instandsetzung überlagern [113<sup>S. 56</sup>].

Darüber hinaus können auch Zwänge zur Bündelung oder zeitlichen Staffelung von Maßnahmen die Entscheidung zum Umsetzungszeitpunkt dominieren. Im Mietbereich erfolgt eher eine Zusammenfassung von Maßnahmen, um die Beeinträchtigungen der Mieter auf einen möglichst kurzen Zeitraum zu begrenzen. Dagegen könnte bspw. die temporär beschränkte Verfügbarkeit von Finanzierungsmitteln eines Eigennutzers eine gestaffelte Modernisierung erfordern, obwohl eine sofortige Instandsetzung der Gebäudekomponenten mit Blick auf ihren Zustand angeraten wäre. Aus technischer Sicht sprechen vor allem die gegenseitigen Abhängigkeiten für eine gebündelte Umsetzung. Beispielsweise ist es wenig zweckmäßig, eine neue Heizungsanlage auf die bestehenden Heizlasten auszulegen, wenn sie kurze Zeit danach durch umfangreiche Dämmmaßnahmen am Gebäude stark überdimensioniert wäre. Übergangslösungen sind zwar möglich, könnten aber die energetische Wirksamkeit einzelner Maßnahmen herabsetzen. Gleichzeitig können sie – über den gesamten Planungszeitraum betrachtet – einen höheren finanziellen Aufwand verursachen.

#### **4.1.4 Unsicherheitsaspekte der Entscheidungssituation**

In der Literatur wird eine große Anzahl an einzelnen Unsicherheiten benannt, mit denen Akteure während eines Gebäudelebenszyklus konfrontiert sind. Zusammenstellungen für die Immobilienwirtschaft, welche sich teilweise auch auf einen Eigennutzer und einen KWK- bzw. PV-Anlagenbetreiber übertragen lassen, finden sich bspw. bei *ROHDE* [224] und sehr umfangreich bei *URSCHEL* [258]. Die gesamte Bandbreite ist für

die betrachtete Entscheidungssituation allerdings nicht von Belang. Tabelle 4 zeigt eine Auflistung von Unsicherheiten, die für eine Gebäudemodernisierungsplanung als relevant erachtet werden können.<sup>63</sup>

**Tabelle 4:** Entscheidungsrelevante Einflussgrößen im Rahmen der Gebäudemodernisierungsplanung und ihre Unsicherheitsdimension

Einflussgröße	Relevante Unsicherheitskategorien / Einflussfaktoren u. a. <sup>64</sup>	Bezug für Unsicherheitsdimension	Unsicherheitsdimensionen		
			Eigenutzer	Vermieter	Anlagenbetreiber KWK/PV
Energierechtliche Gebäude-, Anlagen-, Bauteilanforderungen	Politische, steuerliche und juristische Rahmenbedingungen	aktuelle Regelungen und politische Zielsetzungen	Gefahr	Gefahr	Gefahr
Anlagenwirkungsgrade, Speicherverluste, Bauteil-U-Werte etc. (Funktionsqualität der verfügbaren Technik)	Technische Unsicherheiten, Gebäudesubstanz	(Norm-)Angaben der Hersteller	Gefahr	Gefahr	Gefahr
Anlagenwirkungsgrade, Speicherverluste, Bauteil-U-Werte etc. (Technologische Entwicklung)	Wirtschaftliche Entwicklung	aktueller Stand der Technik	Chance	Chance	Chance
Technische Anlagen-/ Bauteilnutzungsdauer	Technische Unsicherheiten, Gebäudesubstanz	∅ Erwartung für Anlage/Bauteil	Gefahr & Chance	Gefahr & Chance	Gefahr & Chance
Verfügbarkeit Erneuerbarer Energien (fluktuierend)	Umwelt (Wetter)	∅ Erwartung für Objekt/Umfeld	Gefahr & Chance		Gefahr & Chance
Preise für Erwerb/Installation/ Instandhaltung von Anlagen & Bauteilen	Wirtschaftliche Entwicklung	∅ Erwartung für Preise	Gefahr & Chance	Gefahr & Chance	Gefahr & Chance
Arbeits- und Materialaufwand für Installation/Instandhaltung von Anlagen & Bauteilen	Technische Unsicherheiten, Gebäudesubstanz (versteckte Schäden)	Arbeits- & Materialaufwand laut Planung	Gefahr	Gefahr	Gefahr
Verfügbares Eigenkapital zur Finanzierung	Wirtschaftliche Entwicklung (Eigentümereinkommen & -vermögen), Mietwert	∅ Erwartung zu liquiden Mitteln	Gefahr & Chance	Gefahr & Chance	Gefahr & Chance
Verfügbares Fremdkapital zur Finanzierung	Wertentwicklung der Immobilie, Wirtschaftliche Entwicklung (Eigentümereinkommen & -vermögen), Mietwert	∅ Erwartung zur Kreditwürdigkeit	Gefahr & Chance	Gefahr & Chance	Gefahr & Chance
Kreditzinsen, Zinsbindungsdauer, Anschlussfinanzierung etc.	Wirtschaftliche Entwicklung, Mietwert, Wertentwicklung der Immobilie	∅ Erwartung für Kapitalmarkt	Gefahr & Chance	Gefahr & Chance	Gefahr & Chance

<sup>63</sup> Gegebenenfalls auch für die Modernisierungsentscheidung relevant aber an dieser Stelle vernachlässigt werden u. a. Unsicherheiten hinsichtlich Genehmigung, Termineinhaltung, Haftung, Rechtsstreitigkeiten, Großschadensereignissen etc. Für eine detaillierte Auflistung vgl. *URSHEL* [258].

<sup>64</sup> In Anlehnung an den Katalog von *URSHEL* [258].

(Fortsetzung Tabelle 4)

Eingangsgrößen / Parameter	Relevante Unsicherheitskategorien / Einflussfaktoren u. a. <sup>65</sup>	Bezug für Unsicherheitsdimension	Unsicherheitsdimensionen		
			Eigenutzer	Vermieter	Anlagenbetreiber KWK/PV
Staatliche Investitionszuschüsse, Zinsverbilligung, Förderquoten, Bewilligungsanforderungen etc.	Politische, steuerliche und juristische Rahmenbedingungen, wirtschaftliche Entwicklung	aktuelle Regelungen	Gefahr & Chance	Gefahr & Chance	Gefahr & Chance
AfA-Höhe und -zeitraum, Steuersätze etc.	Politische, steuerliche und juristische Rahmenbedingungen	aktuelle Regelungen	Chance	Gefahr & Chance	Gefahr & Chance
Preise für Energiebezug	Wirtschaftliche Entwicklung, Politische, steuerliche und juristische Rahmenbedingungen	∅ Erwartung für Preise	Gefahr & Chance		Gefahr & Chance
Erwarteter Energieverbrauch	Umwelt (Wetter), Nutzerverhalten, technische Unsicherheiten, Gebäudesubstanz	Energiebedarf	Gefahr & Chance		Gefahr & Chance
Erreichbares Mietpreisniveau/ Vergleichsmietenniveau	Mietwert, soziodemographische Entwicklung, Immobilienmarkt, soziale Unsicherheiten	∅ Erwartung für Objekt/Umfeld		Gefahr & Chance	
Mieterwechselrate/ Fluktuation	Soziale Unsicherheiten	∅ Erwartung für Objekt		Gefahr & Chance	
Leerstandzeiten/ Objektauslastung	Soziodemographische Entwicklung, Immobilienmarkt, soziale Unsicherheiten	∅ Erwartung für Objekt		Gefahr & Chance	
Mietausfall	Soziale Unsicherheiten	Zahlung laut Mietvertrag		Gefahr	
Mietsteigerungssperrfrist, Kappungsgrenze, Modernisierungsumlagefaktor etc.	Politische, steuerliche und juristische Rahmenbedingungen	aktuelle Regelungen		Gefahr	
Erzielbare Preise für Energielieferung (objektintern/Netzeinspeisung)	Wirtschaftliche Entwicklung	∅ Erwartungen für Preise			Gefahr & Chance
Forderungsausfall bei Energielieferung (Wärme & elektr. Energie)	Soziale Unsicherheiten	Zahlung laut Liefer- bzw. Mietvertrag		Gefahr	Gefahr
Zuschläge/Vergütungssätze für elektrische Energie aus KWK & PV	Politische, steuerliche und juristische Rahmenbedingungen	aktuelle Regelungen			Gefahr
Umlagen/Abgaben im Rahmen der Energielieferung	Politische, steuerliche und juristische Rahmenbedingungen	aktuelle Regelungen			Gefahr

<sup>65</sup> In Anlehnung an den Katalog von *URSHEL* [258].

Die Unsicherheiten können durchaus Wechselwirkungen unterliegen und sind nicht immer als reine Gefahren zu interpretieren. In Abhängigkeit davon, welcher Zustand erwartet bzw. erhofft wird, kann sich eine mögliche Abweichung auch positiv auf die Zielerreichung des Investors auswirken und somit als Chance erweisen. Wie ausgewogen Gefahr und Chance sich gegenüberstehen, wird grob durch die Unterscheidung in eindimensionale Unsicherheiten (eine Abweichung würde den Investor generell schlechter bzw. ausschließlich besser stellen) und zweidimensionale Unsicherheiten (eine Abweichung birgt sowohl Gefahren als auch Chancen) vorgenommen.<sup>66</sup>

Die zukünftige Entwicklung des energierechtlichen Rahmens für Gebäude und deren technische Ausstattung wird hier nur mit der Gefahrendimension gesehen. Dies begründet sich aus der Annahme, dass sich die Regelungen weiter verschärfen werden und dadurch der Entscheidungsfreiraum des Eigentümers einer zunehmenden Einschränkung unterliegen könnte. Relevant ist dieser Aspekt bei der Wahl des Umsetzungszeitpunktes, da bei einer Verschiebung von Maßnahmen später gegebenenfalls strengere gesetzliche Anforderungen zu erfüllen sind, wohingegen bereits umgesetzte Maßnahmen bzw. Entscheidungen Bestandsschutz genießen. Gleiches gilt für die Zuschläge bzw. Vergütungssätze für elektrische Energie aus KWK und PV, deren in der Vergangenheit stark ausgeprägte Subventionierung zur Marktdurchdringung dieser Technologien zukünftig deutlich geringer ausfallen könnte. Die EEG-Novellierung 2014 bestätigt diesen Trend.

Für den Vermieter ist eine wesentliche Unsicherheit bezüglich seiner Modernisierungsentscheidung in der Entwicklung der Mieteinnahmen zu sehen. Hierunter fallen alle Einflüsse auf der Mieterseite aber auch Unsicherheiten, die aus der Objektverwaltung bzw. dem Objektmanagement erwachsen, sofern letztere Aufgaben an externe Dienstleister übertragen wurden. Für den Selbstnutzer steht dagegen die Entwicklung der Energiepreise im Vordergrund. Gleiches gilt für den KWK-/PV-Anlagenbetreiber hinsichtlich der erzielbaren Preise für die objektinterne Stromlieferung bzw. für die Netzeinspeisung und seines gegebenenfalls erforderlichen Energiebezugs. Zusätzlich besteht für ihn die Gefahr geringerer oder die Chance höherer Energieliefermengen im Vergleich zu seiner Erwartung. Der für den Energieverbrauch wesentliche Faktor „Nutzerverhalten“ ist als Unsicherheit allerdings nur für den Anlagenbetreiber bei der Versorgung Dritter relevant, da der Selbstnutzer sein eigenes Verhalten prinzipiell beeinflussen kann. Der Vermieter ist vom Energienutzungsverhalten seiner Mieter

---

<sup>66</sup> In der Literatur zu Risiken in der Immobilienwirtschaft werden unter eindimensionalen Unsicherheiten oftmals nur Gefahren verstanden (vgl. bspw. [112 S. 13/189 S. 10/280 S. 19]). Letztendlich ist die Sichtweise aber abhängig vom erwarteten Zustand der unsicheren Einflussgröße. Im Rahmen der vorliegenden Arbeit macht es Sinn, auch die ausschließliche Chancendimension als eindimensionale Unsicherheit zu erfassen. Ein Beispiel dafür ist die in der Vergangenheit immer wieder politisch diskutierte Möglichkeit für Eigennutzer, Modernisierungsinvestitionen steuerlich berücksichtigen zu können.

nicht direkt betroffen. Allerdings besteht für ihn die Unsicherheit, dass der Mieter die Kosten der Wärmenutzung nicht zahlt, was hier dem „Zahlungsausfall für Energielieferung“ zugerechnet wird. Neben den rollenspezifischen Gefahren und Chancen sind die Unsicherheiten, welche mit den Auszahlungen und deren Finanzierung zur Maßnahmenumsetzung und der Aufrechterhaltung des technischen Gebäude- bzw. Anlagenbetriebs im Zusammenhang stehen, für alle drei betrachtete Akteursrollen gleichermaßen relevant.

## 4.2 Überblick zu existierenden Arbeiten und Ansätzen

Nach der Charakterisierung der Entscheidungssituation „Wohngebäudemodernisierung“ wird in diesem Unterkapitel zunächst ein Überblick zu existierenden Arbeiten gegeben, welche die energetische Gebäudegestaltung thematisieren. Das Schrifttum weist durch die Vielschichtigkeit der möglichen Fragestellungen und der verschiedenen eingenommenen Blickwinkel eine sehr große Bandbreite auf. Die einzelnen Beiträge unterscheiden sich u. a. hinsichtlich:

- der Grenzen des betrachteten Systems und der einbezogenen Entscheidungsgrößen (Freiheitsgrade der Analyse),
- der angesetzten Bewertungsmaßstäbe (Anzahl und Art) und der verwendeten Bewertungsverfahren,
- der einbezogenen Rahmenbedingungen des Entscheidungsträgers sowie
- der Analysemethodik zur Auswahl des energetischen Gebäudedesigns.

Der Fokus für die folgende Übersicht liegt auf wissenschaftlichen und praxisorientierten Bewertungsansätzen bzw. Modellen, welche auf die Entscheidungsunterstützung eines Gebäudeeigentümers bei der Modernisierungsplanung unter Berücksichtigung der ökonomischen Konsequenzen abzielen. Betrachtet werden vor allem Ansätze, welche gleichzeitig verschiedene technische Gestaltungsoptionen sowohl auf der Energiebereitstellungsseite als auch auf der Energienutzungsseite des Gebäudes einbeziehen und/oder bei denen die detaillierte Erfassung der Maßnahmenfinanzierung einen hohen Stellenwert einnimmt. Im Anschluss an die Übersicht werden die Ansätze im Rahmen einer zusammenfassenden Gegenüberstellung hinsichtlich ihrer Stärken und Schwächen beurteilt. Ziel ist das Aufzeigen der methodischen Lücke im Bereich der entscheidungsvorbereitenden Planungsinstrumente zur Gebäudemodernisierung unter wirtschaftlichen Gesichtspunkten, die mit dem zu entwickelnden Modell geschlossen werden soll.

Darüber hinaus existiert eine Vielzahl von Beiträgen, welche nur einzelne Aspekte des Gebäudeenergiesystems beleuchten, diese dafür aber im Detail untersuchen. Sie konzentrieren sich bspw. auf die Gebäudeautomatisation bzw. setzen den Analyse-schwerpunkt auf die Auslegung und vor allem den Betrieb einzelner Versorgungstechnologien.<sup>67</sup> Diese Ansätze beruhen auf ähnlichen Entscheidungsmodellen, wie die im Folgenden beschriebenen, allerdings sollen sie aufgrund ihrer eingegrenzten Perspektive nicht im Mittelpunkt der Betrachtung stehen. Gleiches gilt für Arbeiten, welche das energetische Gebäudedesign allein an der Energiebedarfsreduktion oder der Nutzungsqualität ausrichten bzw. ausschließlich einen techno-ökologischen Blickwinkel einnehmen.<sup>68</sup> Nicht zuletzt sei an dieser Stelle noch auf die Arbeit von *WILHELM* [282] verwiesen, welcher einen interessanten modellbasierten Ansatz zur Bestimmung optimaler Instandsetzungsstrategien unter Berücksichtigung stochastischer Alterungsprozesse erarbeitet. Seine Analyse beschränkt sich jedoch auf die separate Betrachtung einzelner Gebäudekomponenten mit Fokus auf den Ersatzzeitpunkt und die jeweilige Ersatzmaßnahme. Die Frage nach der energetischen Systemgestaltung unter Berücksichtigung der Komponentenwechselwirkungen steht dabei eher im Hintergrund.

### 4.2.1 Ansätze zur Einzelbewertung und Variantenvergleiche

Der einfachste und deshalb vor allem in der Praxis anzutreffende Weg zur Beurteilung und Auswahl von Modernisierungsoptionen besteht in der wirtschaftlichen Bewertung eines vorgegebenen Maßnahmenbündels. Gegebenenfalls erfolgt auch ein Vergleich von wenigen alternativen Maßnahmenbündeln, welche ebenfalls vorab zu definieren sind. Die angewandten Entscheidungsmodelle beschränken sich dabei auf die Methoden der Investitionsrechnung.

Eine Vielzahl von Beiträgen mit dieser Vorgehensweise entstehen bspw. am Darmstädter *INSTITUT WOHNEN UND UMWELT (IWU)*. Die Publikationen reichen von der theoretischen Auseinandersetzung mit der Entscheidung zur Gebäudemodernisierung bis hin zur Wirtschaftlichkeitsanalysen realer Sanierungsvorhaben (*BORN ET AL.* [45], *ENSELING* [89], *FEIST* [98]). In der Regel wird in den Untersuchungen vom sogenannten Kopplungsprinzip (*ENSELING & HINZ* [91]) ausgegangen, welches unterstellt, dass über Modernisierungen nur im Zusammenhang mit bereits fest geplanten Instandsetzungsarbeiten entschieden wird. Die Maßnahmenbeurteilung beruht vorrangig auf einem Mehrertragsansatz, bei dem lediglich die der Modernisierung zuzuordnenden Auszah-

---

<sup>67</sup> Vgl. bspw. *HAWKES ET AL.* [134], *HUANG & LAM* [144], *LOZANO ET AL.* [181], *MASSIE* [192], *SCHÖNFELDER* [238] und *VETTER* [268].

<sup>68</sup> Vgl. bspw. *AL-HOMOUD* [9], *BOUCLAGHEM* [46], *COLEY & SCHUKAT* [65] und *TRESIDDER ET AL.* [257].

lungen<sup>69</sup> den daraus generierten Effekten gegenübergestellt werden. Für den Eigentümer wird die Maßnahmenwirtschaftlichkeit anhand des Vergleichs zwischen dem mittleren zukünftig erwarteten Energiepreinsniveau innerhalb des Maßnahmennutzungszeitraums und dem Preis einer Einheit eingesparter Endenergie vorgenommen. Letzterer wird aus der Anfangsauszahlungsannuität und der laufenden Zusatzkosten ermittelt (*GROßKLOS* [121], [89]).

Für den Vermietungsbereich erfolgt die Beurteilung dagegen unter Berücksichtigung der modernisierungsbedingten Mieteinnahmenanteile. Hierfür werden üblicherweise zwei Mietverlaufmodelle für drei verschiedene Marktbedingungen (dynamisch, konsolidiert und strukturschwach) herangezogen (*ENSELING & HINZ* [90/91]). Modell I unterstellt, dass das Bestandsmietniveau der ortsüblichen Vergleichsmiete entspricht und Erhöhungen nur im Rahmen der Modernisierungsumlage möglich sind. Modell II basiert auf der Annahme, dass das Bestandsmietniveau unterhalb der ortsüblichen Vergleichsmiete liegt und durch die Modernisierung dauerhaft höhere Mieteinnahmen gegenüber dem unmodernisierten Zustand erreicht werden können. Die Einflüsse von Mieterwechseln bzw. Neuvermietung bleiben allerdings oftmals unberücksichtigt [90/149]. Die Beurteilung für den Mietbereich basiert vorrangig auf der Kapitalwertmethode (*LOGA ET AL.* [179], [89]), aber auch auf der vollständigen Finanzplanung (*ENSELING ET AL.* [92], [149]). Für beide Bereiche – Eigennutzung und Vermietung – werden Maßnahmenbündel betrachtet, deren Zusammensetzung sich in der Regel auf übliche bzw. die im begutachteten Projekt umgesetzten Maßnahmen beschränkt. Darüber hinaus werden der Aspekt „Warmmietenneutralität für die Nutzer“ und einzelne staatlich geförderte Kredite in die Analyse einbezogen (*DISCHER ET AL.* [80], *STOLTE ET AL.* [250]).

*MARTINAITIS ET AL.* [190] schlagen ein ähnliches vereinfachtes Entscheidungsverfahren vor. Bei ihrem Ansatz sind zunächst die Anfangsauszahlungen für die Maßnahmenoptionen in den Instandsetzungsanteil und den Modernisierungsanteil aufzuspalten. Letzterer kann für Ersatzmaßnahmen allerdings nur beim Austausch vor dem Erreichen der technischen Nutzungsdauer einen Wert größer null aufweisen. Der Modernisierungsanteil entspricht der Anfangsauszahlung multipliziert mit dem Verhältnis der Restnutzungsdauer zur Standardnutzungsdauer des zu ersetzenden Bauteils. Sofern die technische Nutzungsdauer des alten Bauteils erreicht ist, wird die Ersatzmaßnahme vollständig als Instandsetzung gesehen. Zur Beurteilung wird der Modernisierungsanteil der Anfangsauszahlung dem Barwert der eingesparten Energiekosten durch die Maßnahmen über deren Standardnutzungsdauern gegenübergestellt. Als

---

<sup>69</sup> Oftmals auch als „energiebedingte Mehrkosten“ bezeichnet. Gemeint sind aber die Anfangsauszahlungen der Investition und die dadurch bedingten Auszahlungen der Folgejahre.

weiteres Beurteilungskriterium wird eine Obergrenze für das Investitionsvolumen empfohlen. So ist in der Regel die Maßnahmenumsetzung abzulehnen, wenn die erforderlichen Anfangsauszahlungen und der erzielbare Gebäudeliq uidationserlös vor der Sanierung die Herstellungsauszahlung für einen äquivalenten Neubau übersteigen.

*PFNÜR ET AL.* [217] untersuchen mit ihrer Studie die Wirtschaftlichkeit von Klimaschutzinvestitionen in der Wohnungswirtschaft. Berücksichtigung finden dabei auch nichtenergetische Modernisierungsmaßnahmen. Im ersten Teil wird die Analyse für jeweils vier Musterwohneinheiten in Ein- und Mehrfamilienhäusern sowohl für den Eigennutzungs- als auch den Vermietungsfall durchgeführt. Die Typisierung der Wohneinheiten erfolgt anhand einer Clusterung der deutschen Gebäudetypologie des *IWU* [148] bezüglich des Endenergiebedarfs vor der Sanierung. Für die energetische Modernisierung wird ein einheitliches Standardmaßnahmenbündel für eine Vollsanierung unterstellt. Die Wirtschaftlichkeitsanalyse beruht auf einer vollständigen Finanzplanung, wobei der Kauf der Immobilie im Bewertungsschema mit erfasst wird. Als Beurteilungsgröße wird die Rendite des eingesetzten Eigenkapitals herangezogen. Gegenübergestellt werden der Kauf ohne und der Kauf mit sofortiger Sanierung. Darüber hinaus werden die reinen Sanierungsinvestitionen isoliert betrachtet. Auch *PFNÜR ET AL.* unterstellen damit das Kopplungsprinzip bei einem fixierten Umsetzungszeitpunkt. Allerdings verwenden sie nicht den Mehrertragsansatz sondern betrachten die Zahlungsströme innerhalb des zehnjährigen Planungszeitraums in Gänze. Für den Vermietungsfall wird differenziert zwischen vollständiger Ausnutzung der gesetzlichen Möglichkeit zur Modernisierungsumlage und einer beschränkten Mietsteigerung unter Beachtung einer wirtschaftlichen Belastungsgrenze der Mieter. Während die Inanspruchnahme staatlich geförderten Fremdkapitals erfasst wird, bleiben Steuern ebenso unberücksichtigt, wie ein Mieterwechsel. Die Clusteruntersuchung wird im zweiten Teil durch die Wirtschaftlichkeitsanalyse von 25 realen Fällen ergänzt, wobei einzelne Eingangsparameter zusätzlich einer Sensitivitätsanalyse unterzogen werden.

*KIEßLING* [163] beleuchtet in seiner Arbeit die Modernisierungsentscheidung aus dem Blickwinkel eines Vermieters und erarbeitet einen Ansatz, der Möglichkeiten zur Fremdfinanzierung und die Auswirkungen auf die Steuerlast des Eigentümers in die Beurteilung einschließt. Die Frage nach dem Umsetzungszeitpunkt bleibt unberücksichtigt und er betrachtet in seinem Fallbeispiel lediglich ein vorgegebenes Maßnahmenbündel für ein Mehrfamilienhaus. Allerdings werden in der Analyse Mieterwechsel erfasst und die Mietzahlungen nach Neu- und Bestandsmietern differenziert. Die Maßnahmenumsetzung wird ihrer Unterlassung gegenübergestellt und die jeweiligen ökonomischen Konsequenzen werden miteinander verglichen. Sein Bewertungsverfahren beruht ebenfalls auf der vollständigen Finanzplanung, welche in Form einer Tabellenkalkulation umgesetzt wird.

Der Ansatz des Kopplungsprinzips für den Bereich der Gebäudebewirtschaftung wird vor allem von Vertretern der Immobilienwirtschaft kritisiert [262]. So argumentiert der *BUNDESVERBAND DEUTSCHER WOHNUNGS- UND IMMOBILIENUNTERNEHMEN E. V. (GdW)* in seiner Arbeitshilfe zum energieeffizienten Bauen und Modernisieren [113<sup>s.56</sup>], dass die Entscheidung zur Maßnahmenumsetzung oftmals wesentlich stärker von den vermietungsrelevanten Umfeldbedingungen des einzelnen Gebäudes abhängig ist, als von der Instandsetzungsnotwendigkeit aufgrund von Alterung und Verschleiß. Auch der *GdW* empfiehlt zur Wirtschaftlichkeitsberechnung die vollständige Finanzplanung und verweist auf den ganzheitlichen Einbezug der entscheidungsrelevanten Zahlungsgrößen [113<sup>s.70</sup>]. Hinsichtlich der Mietsteigerungsmöglichkeiten wird ebenfalls zwischen drei verschiedenen Marktbedingungen (strukturschwach, konsolidiert und dynamisch) differenziert, allerdings werden neben den oben erwähnten Mietverlaufsmodellen des *IWU* zwei weitere Fälle benannt. Hierbei handelt es sich einerseits um die Möglichkeit zur Vergleichsmietpreisanpassung und andererseits um den Fall der Modernisierungsumlage bei einer Bestandsmiete über dem Vergleichsmietniveau [113<sup>s.65</sup>].

Allen in diesem Abschnitt beschriebenen Ansätzen ist gemein, dass die Zusammenstellung des Maßnahmenbündels und dessen wirtschaftliche Beurteilung sukzessiv durch den Modellanwender vorzunehmen sind. Zur Ermittlung des resultierenden Energiebedarfs als entscheidungsrelevante Einflussgröße für den Eigennutzerbereich kommen in der Regel EDV-Anwendungen zum Einsatz, welche auf standardisierten Verfahren zur Gebäudeenergiebilanzierung<sup>70</sup> bzw. auf einer detaillierten energetischen Gebäudesimulation beruhen (bspw. *VERBEECK & HENS* [263]). In den folgenden beiden Abschnitten werden dagegen Entscheidungsmodelle vorgestellt, welche die Methoden des Operations Research nutzen. Diese Ansätze sind in der Lage, die Auslegung des energetischen Gebäudedesigns und die damit verbundenen ökonomischen Konsequenzen simultan zu betrachten.

#### 4.2.2 Optimierungsmodelle mit integrierter Gebäudesimulation

Eine sehr breite Anwendung in der Forschung und auch in der Praxis haben Ansätze gefunden, welche eine Software zur energetischen Gebäudesimulation<sup>71</sup> mit einem Optimierungstool<sup>72</sup> koppeln. Das grundlegende Konzept dieser Methode besteht in der automatisierten Vorgabe der Eingangsparameter des Simulationsmodells, welches als Lösung die definierten Zielgrößen ermittelt. Das Optimierungstool verfolgt die

---

<sup>70</sup> DIN V 4701-10/DIN V 4108-6, DIN V 18599, DIN EN ISO 13790 und DIN EN 15265.

<sup>71</sup> Bspw. *TRNSYS* [165], *DOE-2* [283], *EnergyPlus* [67]. Weitere Programme erwähnen *NGUYEN ET AL.* [205].

<sup>72</sup> Solche Softwareentwicklungen werden u. a. von *ELLIS ET AL.* [88], *WETTER* [278] und *CHRISTENSEN ET AL.* [63] vorgestellt. Weitere verfügbare Tools benennen *NGUYEN ET AL.* [205].

Strategie, durch eine möglichst gezielte Variation der Eingangsparameter und wiederholte Simulationsläufe die Zielgrößen in ein Minimum bzw. Maximum zu führen. Zur Anwendung kommen hierfür vor allem direkte Suchstrategien (bspw. *Pattern Search*) und metaheuristische Verfahren (bspw. genetische Algorithmen oder die Partikelschwarmoptimierung).<sup>73</sup> Umfangreiche Modelle und Analysen basierend auf dieser Vorgehensweise werden bspw. von *BAMBROOK ET AL.* [21], *BICHIOU & KRARTI* [33], *NIELSEN* [207] oder *PEIPPO ET AL.* [212] beschrieben. Letzterer Ansatz wird stellvertretend für die zahlreichen Arbeiten kurz vorgestellt.<sup>74</sup>

*PEIPPO ET AL.* [212] stützen sich auf eine vereinfachte Gebäudesimulation mit relativ kurzen Laufzeiten. Wie bei vielen der simulationsgekoppelten Ansätze wird zur optimalen Systemgestaltung nicht nur die Auslegung einzelner Versorgungstechnologien und Dämmmaßnahmen berücksichtigt, sondern auch das konstruktive Gebäudedesign selbst, indem der Einfluss der Gebäudegeometrie bzw. -ausrichtung und der Fensterflächen auf den Energiebedarf in die Analyse einbezogen werden. Betrachtet wird der Energiebedarf für die thermische Raumkonditionierung, Warmwasser und elektrische Energieanwendungen. Dem Modell unterliegen Energienutzungsdaten für ein repräsentatives Jahr mit einem sich wiederholenden, stündlich gegliederten Typtag. Der Heiz- und Kühlbedarf wird mittels Solltemperaturbereichen und unter Berücksichtigung der Standortklimadaten bestimmt. Ziel ist die Minimierung der Summe aus der Anfangsauszahlungsannuität und der jährlichen Auszahlungen für die Energienutzung unter vorgegebenen Energiebedarfsrestriktionen. Vorgestellt wird die Modellanwendung für ein Einfamilienhaus und ein großes Bürogebäude, jeweils in drei unterschiedlichen Klimazonen.

Obwohl mit dem Einbezug von geometrischen und konstruktiven Freiheitsgraden der Einsatzschwerpunkt dieser Optimierungsmodelle eher in der Neubauplanung zu verorten ist, werden sie auch im Bereich der Modernisierungsplanung zur Entscheidungsunterstützung genutzt. *PERNODET-CHANTRELLE ET AL.* [213] verwenden ein solches Modell bspw. für die Modernisierungsplanung eines Schulgebäudes. Die Handlungsoptionen umfassen Maßnahmen an der opaken Gebäudehülle und verschiedene Fenstertypen sowie die Steuerung der Raumautomation. Die Entscheidungssituation wird als multikriterielle Optimieraufgabe betrachtet. Zur Lösung kommt ein genetischer Algorithmus zum Einsatz. Als Zielgrößen werden der jährliche Energiebedarf,

---

<sup>73</sup> Vgl. u. a. *BANDARA & ATTALGE* [22], *EISENHOWER ET AL.* [87], *KÄMPF ET AL.* [155], *WETTER & WRIGHT* [279]. Viele der Methoden zur Verknüpfung von Simulation und Optimierung werden bspw. in [34] erörtert.

<sup>74</sup> Weitere Modellentwicklungen und -anwendungen beschreiben u. a. *HASAN ET AL.* [133], *WANG ET AL.* [274], *CALDAS & NORFORD* [60], *DJURIC ET AL.* [81], *WRIGHT ET AL.* [286] und *PEDERSEN* [210]. Einen breiten Literaturüberblick zu Optimierungsmodellen mit simultaner Gebäudesimulation geben bspw. *NGUYEN ET AL.* [205], *EVINS* [96] und *KOLOKOTSA ET AL.* [168].

die Anfangsauszahlungen der Maßnahmenumsetzung sowie die thermische Behaglichkeit definiert. Die Bestimmung des Energiebedarfs beruht auf einer Gebäudesimulation für ein Jahr mit stündlicher Schrittweite. Eine weitere Anwendung eines solchen Modelltyps im Rahmen einer Gebäudemodernisierung beschreiben bspw. *JIN & OVEREND* [153]. Auch ihre Arbeit stützt sich auf eine multikriterielle Optimierung mit einem genetischen Algorithmus. Während *PERNODET-CHANTRELLE ET AL.* auf diskrete vordefinierte Sanierungsstrategien für einzelne Bauteile zurückgreifen, betrachten sie die Ausprägung der Modernisierungsmaßnahmen zur energetischen Hüllengestaltung eines Bürogebäudes kontinuierlich. Als ökonomische Bewertungsgröße wird die statische Amortisationsdauer ermittelt.

### 4.2.3 Optimierungsmodelle ohne integrierte Gebäudesimulation

Die dritte in der Literatur vorgestellte Gruppe von Entscheidungsmodellen verzichtet während der Optimierung des energetischen Designs auf spezielle Werkzeuge zur Gebäudesimulation. Im Gegensatz zur simulationsgekoppelten Vorgehensweise, bei denen neben den impliziten Nebenbedingungen des Optimierungstools das Simulationstool als explizites Restriktionensystem fungiert, werden bei diesen Modellen alle Entscheidungsgrößen ausschließlich impliziten Restriktionen unterworfen [252 S. 292].

Ein derartiges Analyseinstrument – basierend auf einem genetischen Lösungsalgorithmus – beschreiben *PERNODET ET AL.* [214]. Eine der Zielgrößen ihres multikriteriellen Modells betrifft den jährlichen Energiebedarf für Raumheizung, Belüftung, Beleuchtung und weitere elektrische Energieanwendungen. Der Energiebedarf in Abhängigkeit der gewählten Maßnahmen wird mithilfe eines gebäudespezifischen Polynoms abgeschätzt, welches für jeden Anwendungsfall vorab – bspw. durch ein Gebäudesimulationstool – neu zu validieren ist. Berücksichtigung finden u. a. der U-Wert und die Luftdichtheit der Gebäudehülle sowie die Art und Steuerung der Beleuchtung. Zwei weitere alternative Zielgrößen adressieren die ökonomischen Konsequenzen der Systemgestaltung. Zum einen werden die Anfangsauszahlungen separat betrachtet und zum anderen die Anfangsauszahlungen in Verbindungen mit den laufenden jährlichen Auszahlungen für Energiebezug und Anlagenwartung. Für letztere Zielgröße kommt das Kapitalwertverfahren zu Einsatz. Der Analysezeitraum umfasst 15 Jahre. Angewandt wird das Modell am Beispiel einer Modernisierungsentcheidung für ein Schulgebäude.

*ALMEIDA & DE FREITAS* [10] untersuchen ebenfalls mehrere Modernisierungsoptionen für ein Schulgebäude und nutzen künstliche neuronale Netze, welche zur Bestimmung der Heizwärmebedarfsfunktion in Abhängigkeit der Entscheidungsgrößen (U-Wert der Außenhülle, U-Wert und g-Wert der Fenster sowie die Luftwechselrate) mit einem

Gebäudesimulationsprogramm trainiert werden. Mit ihrem multikriteriellen Optimierungsmodell betrachten sie neben dem Energiebedarf und dem thermischen Komfort die Lebenszykluskosten der Maßnahmen und des Gebäudebetriebs als ökonomische Entscheidungsgröße. Auch sie setzen einen genetischen Algorithmus zur Lösung ein.

Eine andere Untergruppe von Modellen ohne integrierte Gebäudesimulation beruht auf der mathematische Programmierung mit exakten Lösungsverfahren [252<sup>s. 292</sup>]. Der Einsatz dieser Methoden ist im Schrifttum allerdings deutlich weniger vertreten, als die bisher beschriebenen Ansätze [205].

Ein ganzzahliges Optimierungsmodell zur Bestimmung des besten Maßnahmenpaketes und des optimalen Umsetzungszeitpunktes zur Gebäudesanierung stellt *CYPRA* [68] in ihrer Arbeit vor. In die Entscheidungsfindung werden der Barwert der Investitionsanfangsauszahlungen sowie die anlagenbetriebs- und energiebedarfsabhängigen Auszahlungen innerhalb eines endlichen Planungszeitraumes einbezogen. Die betrachteten Maßnahmenpakete beinhalten ex ante definierte Kombinationen von Einzelmaßnahmen zur Modernisierung der Gebäudehülle (Dämm- und Fenstervarianten) sowie zum Austausch vorhandener Wärmebereitstellungsanlagen. Das Modell ist auf die Sichtweise von Eigennutzern ausgerichtet und wird für zwei Einfamilienhäuser mit unterschiedlicher Altersklasse angewandt. Neben dem Einfluss von Investitionszuschüssen wird auch die Auswirkung von Energieeffizienzsertifikaten<sup>75</sup> auf die Entscheidung untersucht.

*DIAKAKI ET AL.* [74] und *ASADI ET AL.* [12] beschreiben in ihren Veröffentlichungen ebenfalls ganzzahlige Entscheidungsmodelle. Im Gegensatz zum Modell von *CYPRA* handelt es sich in beiden Fällen um multikriterielle, nichtlineare Problemformulierungen mit Abbildung diskreter Einzelmaßnahmen, sodass die Zusammensetzung des Maßnahmenbündels Teil der Problemlösung ist. *ASADI ET AL.* wenden ihr Modell im Rahmen einer Modernisierungsentscheidung für ein Einfamilienhaus an und betrachten mehrere Fenstervarianten, verschiedene Außenwand- und Dachdämmungen sowie die Nutzung von Solarthermie zur Wassererwärmung. Die Minimierung der Anfangsauszahlungen zur Maßnahmenumsetzung erfolgt im Zusammenspiel mit der Minimierung des jährlichen Energiebedarfs. Der Beitrag jeder einzelnen Maßnahmenoption zur Energiebedarfsreduktion stellt einen Modelleingangsparameter dar, welcher mithilfe

---

<sup>75</sup> Energieeffizienzsertifikate – auch „Weiße Zertifikate“ genannt – stellen ein Lenkungsinstrument dar, um politische Zielsetzungen zur Reduktion des Energiebedarfs mithilfe eines marktbasiereten Anreizes (Zertifikathandel) zur Umsetzung von Energieeinsparmaßnahmen zu erreichen [47]. Derartige Zertifikatsysteme wurden bspw. in Frankreich, Italien, England und Dänemark etabliert [176]. In Deutschland konnte sich die Einführung eines solchen Instruments im politischen Diskurs bislang nicht durchsetzen. Zur Diskussion hinsichtlich der Notwendigkeit, der Wirksamkeit und der möglichen Ausgestaltung eines Weiße-Zertifikate-Systems für Deutschland vgl. bspw. [56-58/177/211/226/227/230].

einer energetischen Gebäudebilanzierung bestimmt wird. *DIAKAKI ET AL.* beziehen in ihre Beispielanwendung vier verschiedene Fenstertypen und Dämmmaterialien für die Gebäudehülle ein. Zielgrößen sind die Anfangsauszahlungen und der Transmissionswärmeverlust, welcher in Abhängigkeit der thermischen Gebäudehüllengestaltung endogen bestimmt wird. Für die Optimierung kommen Varianten des *Goal Programming* bzw. des *Compromise Programming*<sup>76</sup> zum Einsatz und es wird deren Einfluss auf die Ergebnisse untersucht.

In einer späteren Publikation stellen *DIAKAKI ET AL.* [73] einen umfangreich erweiterten gemischt-ganzzahligen nichtlinearen Ansatz vor. Detailliert untersucht wird die energetische Gestaltung der Gebäudehülle, indem mehrere Tür- und Fenstervarianten sowie verschiedene Materialien für alle Schichten des Wand- und Deckenaufbaus als Handlungsoptionen definiert sind. Die Auswahl erfolgt anhand binärer Entscheidungsgrößen mit Ausnahme der Dämmstoffschichtdicken, welche kontinuierlich betrachtet werden. Der jährliche Heizwärmebedarf wird in Abhängigkeit der Hüllengestaltung mithilfe eines Monatsbilanzverfahrens ermittelt. Darüber hinaus findet die Nachfrage nach Warmwasser und Raumkühlung Berücksichtigung. Zur Befriedigung der Energienachfrage werden verschiedene Bereitstellungstechnologien (Solarthermie, Öl- und Gaskessel, elektrische Wärmeerzeuger) in die Analyse einbezogen, deren Auswahl ebenfalls an Binärvariablen gekoppelt ist. Restriktionen stellen sicher, dass nur ein Versorgungssystem für jede Energieanwendung zum Einsatz kommen kann, wobei auch Kombisysteme zur Verfügung stehen. Die Wechselwirkungen zwischen den Maßnahmen zur Heizwärmebedarfsreduktion und der leistungsmäßigen Anlagenauslegung wird dabei allerdings vernachlässigt. Auch die spezifischen Energiebezugpreise werden nicht erfasst, obwohl verschiedene Energieträger betrachtet werden. Mit Verweis auf den Zusammenhang von Energieverbrauch und Nutzungskosten definieren *DIAKAKI ET AL.* als Zielgrößen den Jahresprimärenergiebedarf, die jährlichen CO<sub>2</sub>-Emissionen und die Anfangsauszahlungen zur Systemgestaltung, deren Gewichtungen sie im Rahmen eines *Compromise Programming* zur Entscheidungsfindung variieren. Bei ihrem Anwendungsfall handelt es sich um ein Einfamilienhaus.

Ein gemischt-ganzzahliges lineares Optimierungsmodell zur Modernisierungsentcheidung beschreibt *GUSTAFSSON* [124]. Mit diesem Ansatz wird nicht nur die Wechselwirkung zwischen den Maßnahmen zur Nutzenergiebedarfsreduktion und der Auslegung der Versorgungsanlagen berücksichtigt, sondern auch die Anlageneinsatzentscheidung. Hierfür werden 22 unterjährig Zeitfenster definiert, in denen die durchschnittliche Wärmelast für Heizung und die Warmwasserbereitstellung vorgegeben ist. Die Monate April bis Oktober werden mit je einem Zeitfenster abgebildet.

---

<sup>76</sup> Zum *Goal Programming* bzw. *Compromise Programming* siehe bspw. [236 S.302 ff.].

Die Wintermonate sind dagegen jeweils in drei Zeitfenster unterteilt. Eines davon repräsentiert die Wochenendtage während die anderen beiden einen typischen Werktag des Monats mit zwei Tageszeitfenstern beschreiben. Letztere Untergliederung dient der Differenzierung von Schwach- und Spitzenlastzeiten, welche sich in unterschiedlichen Tarifen für den Elektroenergiebezug widerspiegeln. Zur Beispielanwendung anhand eines Mehrfamilienhauses werden als Maßnahmen zur Nutzenergiebedarfsreduktion drei Fenstervarianten sowie elf verschiedene Dämmschichtdicken für die Hüllfläche betrachtet. Auf der Energiebereitstellungsseite finden drei Versorgungstechnologien (Wärmepumpe, Ölheizkessel und Nahwärmenutzung) zur Deckung der Wärmelast Berücksichtigung. Der Analysezeitraum beträgt 50 Jahre. Je nach unterstellter Nutzungsdauer beinhaltet dieser mindestens einen Zeitpunkt für den identischen Ersatz der betrachteten Modernisierungsoptionen. Die Maßnahmen an der Gebäudehülle können zum ersten Umsetzungszeitpunkt auch unterlassen werden, sofern kein Handlungszwang zur Instandsetzung besteht. Die ökonomische Vorteilhaftigkeitsbeurteilung beruht auf der Minimierung des Barwertes aller Auszahlungen zur Maßnahmenumsetzung und für den Energiebezug innerhalb des Analysezeitraumes. Für die Problemlösung kommt das *Branch-and-Bound-Verfahren*<sup>77</sup> zum Einsatz. Weitere Modellanwendungen werden u. a. in [123/125/126] vorgestellt.

#### 4.2.4 Zusammenfassende Wertung der existierenden Ansätze

Die vorgestellten Bewertungsansätze bzw. Modelle werden im Folgenden zusammenfassend gegenübergestellt. Ziel ist das Aufzeigen der bestehenden methodischen Lücke im Bereich der entscheidungsvorbereitenden Planungsinstrumente zur Wohngebäudemodernisierung unter wirtschaftlichen Gesichtspunkten. Hierfür werden die existierenden Ansätze dahin gehend beurteilt, inwieweit sie die Akteursrolle des Eigentümers als Selbstnutzer und/oder Vermieter mit den spezifischen Entscheidungseinflussgrößen berücksichtigen und gleichzeitig die für ihn vorteilhafteste Handlungsalternative aus der großen Bandbreite an techno-ökonomischen Handlungsoptionen bei einer Modernisierungsplanung einschließlich der Möglichkeiten zur Bewirtschaftung von stromerzeugenden Anlagen bestimmen können.

Die in der Literatur vorgestellten entscheidungsvorbereitenden Ansätze zur Gestaltung eines Gebäudeenergiesystems unter wirtschaftlichen Gesichtspunkten lassen sich grob in drei Gruppen gliedern (siehe Tabelle 5). Die erste Gruppe repräsentiert Entscheidungsmodelle, welche die Beurteilung einzelner Handlungsalternativen ermöglichen. Im Rahmen der beschriebenen Modellanwendungen wird sowohl die

---

<sup>77</sup> Zum *Branch-and-Bound-Verfahren* siehe bspw. [204 S. 413 ff.].



Sichtweise eines Eigennutzers als auch die Perspektive eines Vermieters eingenommen. Ebenso finden steuerliche Aspekte und die Konsequenzen aus der Maßnahmenfinanzierung unter Berücksichtigung staatlicher Fördermittel detailliert Berücksichtigung. Die wesentliche Schwäche dieser Ansätze besteht darin, dass sie sich auf die Betrachtung weniger Handlungsalternativen beschränken, da diese durch den Modellanwender im Rahmen einer sukzessiven Vorauswahl der einzelnen techno-ökonomischen Handlungsoptionen zu definieren sind. Somit können aus wirtschaftlicher Sicht vorteilhaftere Handlungsalternativen für den Eigentümer unerkannt bleiben oder der mit den verfügbaren Finanzierungsmitteln erreichbare Modernisierungsgrad wird nicht vollständig ausgeschöpft. Weiterhin ist zu festzustellen, dass zwar umfangreiche Bündel aus Einzelmaßnahmen auf der Energiebereitstellungs- und Energienutzungsseite in die Analyse zur Gestaltung des Gebäudeenergiesystems einbezogen werden, die Möglichkeiten zur Bewirtschaftung stromerzeugender Anlagen dabei allerdings kaum Beachtung finden.

Die Ansätze der anderen beiden Modellgruppen sind dagegen in der Lage, ein wesentlich breiteres Spektrum an verschiedenen energetischen Systemgestaltungsoptionen für ein Gebäude in die Analyse einzubeziehen. Diese Entscheidungsmodelle nutzen die Methoden des Operations Research und gliedern sich in Ansätze mit und Ansätze ohne integrierte Gebäudesimulation. Diese Analysemethoden bieten das Potenzial zur vollständigen Erfassung des Handlungsspielraums eines Gebäudeeigentümers bei der Modernisierungsplanung. Jedoch ist festzustellen, dass die vorgestellten Modelle vor allem auf die Energiebedarfsreduktion des Gebäudes ausgerichtet sind und damit lediglich den Blickwinkel eines Selbstnutzers einnehmen können. Den relevanten Aspekten der Vermieterentscheidung oder der Bewirtschaftung einer stromerzeugenden Anlage wird dagegen keine ausreichende Aufmerksamkeit gewidmet. Ebenso sind die Entscheidungen zur Maßnahmenfinanzierung und die Einflüsse von Steuern nicht erfasst.

### **4.3 Anforderungen an das zu entwickelnde Modell**

Die vorgesehene Modellentwicklung soll einen Beitrag zur Schließung der im vorangegangenen Abschnitt aufgezeigten methodischen Lücke im Bereich der entscheidungsvorbereitenden Planungsinstrumente zur Wohngebäudemodernisierung unter wirtschaftlichen Gesichtspunkten leisten. Hierfür sind folgende Kernanforderungen an das zu entwickelnde Modell zu stellen:

- Berücksichtigung der entscheidungsrelevanten Einflussgrößen und Rahmenbedingungen des Gebäudeeigentümers in Abhängigkeit seiner Akteursrolle als Eigennutzer und/oder Vermieter und gegebenenfalls Betreiber einer stromerzeugenden Anlage.
- Simultane Erstellung und wirtschaftliche Bewertung von Handlungsalternativen zur Gebäudemodernisierung aus dem breiten Spektrum an techno-ökonomischen Handlungsoptionen mit differenzierter Betrachtung der Maßnahmenfinanzierung unter Berücksichtigung staatlicher Fördermittel.
- Einsatz eines Optimierungsverfahrens zur Bestimmung der aus wirtschaftlicher Sicht vorteilhaftesten Handlungsalternative für den Eigentümer.

Aus diesen übergeordneten Vorgaben sind nun konkretere Anforderungen abzuleiten, welche Auswirkungen auf die Methodenwahl für das zu erstellende Planungsinstrument in den folgenden Unterkapiteln haben.

Wesentliche Anforderungen an die Abbildung der Entscheidungssituation sind mit der Vorgabe verbunden, eine große Bandbreite an bestehenden techno-ökonomischen Handlungsoptionen in die Analyse einzubeziehen. Dabei sollen die spezifischen Entscheidungseinflussfaktoren des Gebäudeeigentümers umfassend Berücksichtigung finden. So muss es die zu wählende Abbildungsmethodik ermöglichen, alle relevanten Maßnahmen-, Gebäude-, Eigentümer- und Standortparameter zu erfassen. Dazu zählen konstruktive, technische, ökonomische sowie nutzungs- und marktbedingte Einflussgrößen ebenso, wie die gesetzlichen und steuerrechtlichen Gegebenheiten. Gleichzeitig muss die Abbildungsmethodik in der Lage sein, die Wechselwirkungen der einzelnen technischen und ökonomischen Handlungsoptionen sowie deren Abhängigkeiten zu den Rahmenbedingungen des Eigentümers zu beschreiben. Darüber hinaus ist die zeitliche Modellstruktur darauf auszulegen, auch die Wahl des Umsetzungszeitpunkts in die Analyse einbeziehen zu können. Nicht zuletzt sollte sich der Aufwand zur Modellierung der Entscheidungssituation in einem vertretbaren Rahmen bewegen.

Der Handlungsspielraum des Gebäudeeigentümers beinhaltet die Möglichkeit zur Unterlassung von Maßnahmen, sofern kein dringender Grund zu deren Umsetzung vorliegt. Ein derartiger Anlass wäre bspw. die erforderliche Instandsetzung einer Außenwand aufgrund bestehender Bauschäden bzw. ästhetischer Mängel. Für diesen Fall muss es der Analyseansatz erlauben, Handlungszwänge zu definieren, wobei die Wahl geeigneter Maßnahmen gegebenenfalls Modellentscheidung bleibt. Die Vorgabe von Handlungszwängen kann gleichzeitig zur Beachtung von Zielsetzungen und Präferenzen des Eigentümers dienen, die sich mit einem ausschließlichen ökonomischen Blickwinkel in den Modellergebnissen nicht widerspiegeln würden.

Ein weiterer Anspruch ist die detaillierte Betrachtung der Maßnahmenfinanzierungsstruktur. Hinsichtlich der Inanspruchnahme von Fremdkapital besteht im vorliegenden Fall aufgrund der staatlichen Förderrahmenbedingungen die Besonderheit, dass zusätzlich zu den sonst üblichen Bemessungsgrößen (Darlehenslaufzeit und -höhe, Bonität des Kreditnehmers etc.) die Zugriffsmöglichkeiten und Konditionen von der Zusammenstellung des Maßnahmenbündels abhängig sind. Somit sind im Modell die zur Verfügung stehenden Finanzierungsmittel nicht nur nach Eigen- und Fremdkapital abzugrenzen, sondern auch die Abhängigkeiten zwischen Maßnahmenwahl und Fremdmittelinanspruchnahme adäquat zu berücksichtigen. Um der breit gefächerten staatlichen Förderlandschaft gerecht werden zu können, muss die Vorgabe mehrerer verschiedener Zuschuss- und Kreditvarianten mit den jeweiligen Bewilligungsbedingungen den gegebenenfalls erforderlichen Parametern zur Verzinsung, Laufzeit, tilgungsfreien Anfangszeit, Volumenbeschränkung etc. möglich sein. Gleichzeitig sind die Konsequenzen der Mittelwahl detailliert zu erfassen. In diesem Zusammenhang sollen bei der Analyse auch Budgetrestriktionen und Liquiditätsanforderungen des Eigentümers beachtet werden können.

Die Initiierung der Maßnahmen obliegt entweder einer einzelnen Person als Gebäudeeigentümer oder mehreren Personen in Form einer Wohnungseigentümergeinschaft. Für letzteren Fall kann eine einheitliche ökonomische Bewertung der Handlungsalternativen durch die Entscheidungsträger nicht zwingend unterstellt werden. Das ist regelmäßig gegeben, wenn die entscheidungsrelevanten Rahmenbedingungen der einzelnen Akteure stark voneinander abweichen und sie am Nutzen einzelner Maßnahmen in unterschiedlichem Umfang partizipieren. In diesem Zusammenhang ist auch die übergeordnete Anforderung zu berücksichtigen, dass mit dem Planungsinstrument sowohl die Sichtweise eines Eigennutzers als auch eines Vermieters eingenommen werden soll. Darüber hinaus besteht die Maßgabe, eine Kombination aus beiden Akteursrollen innerhalb eines Gebäudes sowie das Auftreten der Eigentümer als Betreiber einer PV- oder KWK-Anlage betrachten zu wollen. Diese Anforderungen führen dazu, dass die wirtschaftlichen Bewertungsgrundlagen hinsichtlich der Modernisierungsmaßnahmen für die beteiligten Akteure grundsätzlich voneinander abweichen können. Das Modell muss deshalb in der Lage sein, Eigentumsverhältnisse und Eigentümer-Nutzer-Beziehungen für einzelne Gebäudebereiche und Versorgungstechnologien widerzuspiegeln sowie die Bewertung der Maßnahmen investorspezifisch vorzunehmen.

Gleichzeitig muss der Ansatz die Überführung unterschiedlicher Akteursstandpunkte in eine mehrheitsfähige Entscheidung leisten, da energetische Modernisierungen oftmals das Gemeinschaftseigentum betreffen. Für wesentliche Maßnahmen, wie bspw. die Installation einer zentralen Versorgungsanlage oder die Dämmung der

Außenwand, ist eine einheitliche Entscheidung unter allen Eigentümern herbeizuführen. Sofern die Rahmenbedingungen und die Bewertungsgrundlage innerhalb einer Eigentümergruppe einheitlich sind, kann diese jedoch vereinfachend als ein Investor betrachtet werden.

Darüber hinaus werden Anforderungen an das Modell gestellt, welche den Umfang der Analysemöglichkeiten bei der Bewertung von Modernisierungsmaßnahmen aus praxisrelevanter und theoretischer Sicht erweitern. Zum einen ist die Möglichkeit vorzusehen, die Warmmietenneutralität für Bestandsmieter zu fordern. Zum anderen sollen aber auch die Auswirkungen von fiktiven Rahmenbedingungen, denen die aktuelle Gesetzeslage entgegensteht (insbesondere Steuergutschriften für Eigentümer oder das Außerachtlassen der EnEV-Bauteilmindestanforderungen) untersucht werden können.

Letztendlich soll das zu entwickelnde Planungsinstrument auch grundsätzlichen Anforderungen an ein Entscheidungsmodell gerecht werden [117 S. 41 f.]. So ist es notwendig, die Komplexität des Modells möglichst gering zu halten, um einerseits seine Handhabbarkeit und Kontrollierbarkeit zu gewährleisten und andererseits eine vertretbare Zeit zum Generieren einer Aussage bzw. eines Ergebnisses zu erreichen. Um aus den Ergebnissen sinnvolle Rückschlüsse auf die reale Entscheidungssituation ziehen zu können, ist diese nicht nur vollständig abzubilden, sondern darf bei der Modellierung auch nicht zu stark vereinfacht oder gar verfälscht werden. Bei der Wahl des Modellhomomorphiegrades ist deshalb ein ausgewogenes Maß zwischen Exaktheit und Abstraktion zu finden [174 S. 20].

Bevor auf Grundlage der gestellten Anforderungen der Einstieg in die Methodendiskussion und -auswahl für das neue Planungsinstrument erfolgt, werden im folgenden Unterkapitel zunächst die Eigentümerzielsetzungen (Zielinhalte und Zielerreichungsvorschriften) definiert, an denen die Modernisierungsentscheidung ausgerichtet werden soll.

## 4.4 Definition der Modellzielgrößen

Die Gebäudebewirtschaftung durch natürliche Personen dient vorrangig zur Erzielung von Einkünften und zur Geldanlage für die Altersvorsorge [233 S. 3, 68]. Dementsprechend sind auch die Modernisierungsstrategien auf die Sicherung und Steigerung der Ertragsfähigkeit des Gebäudes ausgerichtet. Die Handlungsmotive dieser Akteure lassen sich allgemein mit ihrem Gewinnstreben begründen, um dadurch Konsummöglichkeiten zu schaffen. Es handelt sich damit um eine Zielsetzung, für die eine monetär quantifizierbare Zielgröße definiert und mithilfe von Verfahren der Investiti-

onsrechnung ermittelt werden kann. Entsprechend der genannten Beweggründe für die Gebäudebewirtschaftung kommen für diese Akteure als Gewinnzielgrößen das Vermögen und das Einkommen in Betracht.<sup>80</sup>

Bei der Zielgröße „Einkommen“ wird die Breite des Entnahmestroms (bspw. die jährlichen Entnahmen) innerhalb des Planungszeitraums maximiert, an dessen Ende ein vorzugebender Vermögenswert erreicht werden soll [172 S. 12]. Diese Zielsetzung wäre gegebenenfalls für einen professionellen Vermieter relevant, der seinen Lebensunterhalt vorrangig aus der Bewirtschaftung seiner Gebäude bestreitet. Bei der Zielgröße „Vermögen“ ist die Breite des Entnahmestroms vordefiniert und der Vermögenswert am Ende des Planungszeitraums wird maximiert [172 S. 12]. Diese Zielsetzung entspricht einem Vermieter, dem die Immobilie in erster Linie zum Vermögensaufbau im Rahmen der Altersvorsorge dient. Das könnte auf einen Kleinanbieter von Wohnraum<sup>81</sup> zutreffen, für den die Mieterträge nur einen Teil seines Einkommens darstellen oder der die angestrebten Einnahmen im Planungszeitraum lediglich an der Deckung der laufenden Ausgaben orientiert – bspw. um erwünschte Mietverhältnisse zu erhalten.

Im Gegensatz zur Immobilienbewirtschaftung, dient das Gebäude dem Eigennutzer nicht zur Schaffung von Konsummöglichkeiten, sondern zur Befriedigung seines Wohnraumbedürfnisses und stellt damit selbst einen Konsum dar. Auch für ihn nimmt die nachhaltige Werterhaltung bzw. -steigerung des Gebäudes einen hohen Stellenwert ein, da hierin ebenfalls ein wichtiger Baustein zur Altersvorsorge zu sehen ist [249 S. 34]. Eine weitere wesentliche Motivation dieser Akteure zur Umsetzung von Modernisierungsmaßnahmen besteht in der Reduktion ihrer laufenden Energiekosten. Hierin ist eine quantitative Zielsetzung zu sehen, die letztendlich auch auf die Schaffung von (zusätzlichen) Konsummöglichkeiten ausgerichtet ist und sich dem Gewinnstreben im Sinne einer ausgabenminimalen Bedürfnisbefriedigung unterordnen lässt. Somit sind die oben genannten Zielgrößen „Einkommen“ oder „Vermögen“ ebenfalls anwendbar.

Darüber hinaus können sowohl Vermieter als auch Eigennutzer weitere Ziele verfolgen, die aus energetischer Modernisierungssicht relevant sind, sich aber als monetäre Zielgröße nicht quantifizieren lassen. Hierunter fallen bspw. Präferenzen, wie die

---

<sup>80</sup> Für Vermieter wird oft die Zielsetzung einer hohen Rendite bzw. Rentabilität erwähnt (bspw. [113/217]). Die Maximierung einer solchen relativen Zielgröße (bspw. Quotient aus Gewinn und dem eingesetzten Kapital) ist für die Vorteilhaftigkeitsbewertung verschiedener Alternativen nur dann geeignet, wenn der Bezugswert von der Entscheidung unabhängig ist. In diesem Fall führt die Maximierung des Gewinns aber zu einer identischen Vorteilsrelation wie die Maximierung der Rendite, sodass auf den Bezugswert auch verzichtet werden kann. [3 S. 122 ff./135/140 S. 16 ff./172 S. 14].

<sup>81</sup> Zu den Kleinanbietern von Wohnraum (auch „Amateurvermieter“ genannt) zählen Vermieter mit bis zu 20 Wohnungen (im Mittel 6 bis 7 Wohnungen) im Eigentum (Vgl. [254 S. 3, 20] mit Verweis auf [166/234]).

Steigerung des Wohnkomforts (bspw. die thermische Behaglichkeit), oder Vorlieben zum Einsatz bestimmter Technologien. Diese Zielsetzungen dürfen nicht vernachlässigt werden, da sie bei der Entscheidungsfindung einen Einfluss auf die Wahl des Maßnahmenbündels haben. Hieraus würde eine multikriterielle Entscheidungsfindung resultieren, bei der sich die zusätzlichen Zielsetzungen unter Umständen auch als konträr zum Gewinnstreben erweisen könnten. Zur Bestimmung der vorteilhaftesten (Kompromiss-)Alternative bei mehreren Zielsetzungen können verschiedene Vorgehensweisen herangezogen werden [237<sup>S. 46 f.</sup>/209]. Eine Möglichkeit besteht darin, die einzelnen Zielinhalte gewichtet in einer Zielerreichungsvorschrift zu erfassen. Zu beachten ist, dass die Ziele – sofern überhaupt vernünftig quantifizierbar – unterschiedliche Skalierungen aufweisen, was zunächst eine Normierung hinsichtlich ihrer Vergleichbarkeit erforderlich machen würde. Die Vergleichbarkeit ließe sich durch den Ansatz eines Zielerreichungsgrades herstellen, wobei die Vorgabe des bestmöglichen bzw. gewünschten Zielwertes als Normierungsbasis nicht unproblematisch ist. Einige der im Unterkapitel 4.2<sup>S. 67</sup> vorgestellten Arbeiten heben die Notwendigkeit einer multikriteriellen Betrachtung für die Modernisierungsentscheidung hervor (bspw. [10/214]). Allerdings kann unterstellt werden, dass es sich bei vielen der nichtmonetären Präferenzen um Nebenziele handelt, die lediglich ausreichend zu befriedigen sind und deren Nichterfüllung in der Regel keine zulässige Alternative für den Eigentümer darstellt. Eine Maximierung von Zielerreichungsgraden oder eine Minimierung der Zielabweichung (*Compromise* bzw. *Goal Programming*) erscheint somit für derartige Präferenzen wenig zweckmäßig.

Die Erfassung solcher nichtmonetären Präferenzen erfolgt aus diesen Gründen nicht in Form von Extremierungs- oder Approximationszielen sondern als einfache Satisfizierungsziele [237<sup>S. 45</sup>], indem die Umsetzung von Maßnahmenoptionen bzw. die Formulierung von Anforderungen vorgesehen wird, welche die gewünschte Zielerreichung sicherstellen. Ein Beispiel für die Befriedigung einer Technikpräferenz wäre der zwingende Einsatz der KWK-Technologie. Ein Beispiel für die Wohnkomfortpräferenz wäre die Vorgabe eines einzuhaltenden Minstdämmstandards für die Gebäudehülle. Die Satisfizierungsziele bilden somit Restriktionen, die den theoretisch möglichen Handlungsspielraum des Eigentümers von vornherein einschränken. Die Entscheidung zu den restlichen Freiheitsgraden der Systemgestaltung bleibt am Gewinn als dominante Zielsetzung orientiert. Diese Vorgehensweise stützt sich auf die Annahme, dass trotz einzelner konträrer Präferenzen ein Gebäudeeigentümer grundsätzlich dem Gewinnstreben unterliegt.

Einen sinnvollen und interessanten Ansatzpunkt für eine weitere Extremierungsvorschrift bietet allerdings die Zielstellung „Leisten eines Beitrags zum Klimaschutz“ [254 S. 31 f.]. Diese qualitative Präferenz soll durch die Definition der leicht quantifizierbaren Zielgröße „Primärenergiebedarf“ erfasst werden, welche zu minimieren ist. Für sich allein genommen würde die Zielvorgabe lediglich die vollständige Ausschöpfung des technischen Reduktionspotenzials bewirken. Auch wenn diese Präferenz bei einem Gebäudeeigentümer einen hohen Stellenwert einnimmt, ist ihm zumindest ein Interesse an einer wirtschaftlichen Handlungsweise zu unterstellen. Dementsprechend sind geplante jährliche Entnahmen und/oder ein nicht zu unterschreitender Vermögensendwert als monetäre Nebenziele zu beachten. Natürlich könnte eine mindestens zu erreichende Primärenergiebedarfsreduktion auch als Satisfizierungsziel im Rahmen der Gewinnmaximierung berücksichtigt werden, allerdings spricht für den Ansatz einer Minimierungsvorschrift noch ein weiterer Grund. Die Entscheidungsergebnisse dieser Analysevariante sind auch aus rechtlicher Sicht interessant, da dem Wirtschaftlichkeitsgebot laut Gesetzestext Vorrang vor der Durchsetzung von Bestimmungen zur Erreichung politischer Zielsetzungen eingeräumt wird. Die erreichte Primärenergiebedarfsreduktion zeigt die Grenze des dahin gehenden Handlungsspielraums eines Gebäudeeigentümers auf, die unter der Maßgabe der „wirtschaftlichen Vertretbarkeit“ gerade noch gerechtfertigt werden kann.

Obwohl durchaus vorstellbar, wird auf die Möglichkeit zur parallelen Extremierung der definierten Zielsetzungen im Rahmen dieser Arbeit aufgrund der hieraus resultierenden Komplexitätssteigerung und der oben angeführten Schwierigkeiten bei einer multikriteriellen Betrachtung verzichtet. Im Falle mehrerer Gebäudeteileigentümer wird ebenfalls eine einheitliche Zielsetzung für alle Entscheidungsträger unterstellt. Das zu entwickelnde Modell soll somit drei separate (monokriterielle) Analysevarianten zur Planung von Modernisierungsmaßnahmen bieten, welche alle die Wirtschaftlichkeit des Maßnahmenbündels berücksichtigen. Die ersten beiden Varianten dienen zum Auffinden der vorteilhaftesten Alternative hinsichtlich einer Gewinnmaximierungsabsicht in Form von Einkommen oder Vermögen. Vordefinierte Eigentümerpräferenzen bzw. akteursspezifische Entscheidungskriterien werden als Einschränkungen des Handlungsspielraums erfasst. Für die restliche (freie) Systemgestaltung bleibt die Gewinnmaximierung ausschlaggebend. Die dritte Analysevariante dient der Identifikation einer Alternative, die unter Wahrung der (Mindest-)Wirtschaftlichkeit den geringsten Bedarf an Primärenergie aufzeigt. Hierfür werden im Gegensatz zur Gewinnmaximierung die monetären Präferenzen als Satisfizierungsziele in Form von Restriktionen definiert. Die Anwendung der verschiedenen Analysevarianten ermöglicht die Auslotung des Eigentümerhandlungsspielraums für Modernisierungsmaßnahmen, der mit dem dehnbaren Begriff „wirtschaftlich“ in Verbindung gebracht werden kann.

## 4.5 Vorüberlegungen zur Modellierungs- und Analyseverfahren für das zu entwickelnde Modell

Im Hinblick auf die gestellten Anforderungen ist für das zu entwickelnde Modell eine Methode anzuwenden, welche die Zusammenstellung des Maßnahmenbündels, das Treffen der ökonomischen Entscheidungen und die Alternativenbeurteilung simultan leistet. Der Aufwand zur Modellierung der Entscheidungssituation wird dadurch auf die einmalige Vorgabe einzelner technischer und ökonomischer Handlungsoptionen beschränkt. Dabei ist durch ein Restriktionensystem zu gewährleisten, dass aus der Vielzahl der möglichen Kombinationen nur zulässige Alternativen unter Berücksichtigung der bestehenden Interdependenzen zwischen den Entscheidungsaspekten und den Rahmenbedingungen gebildet werden. Aus diesem ist die vorteilhafteste hinsichtlich der definierten Zielsetzungen mithilfe eines Optimierungsverfahrens zu identifizieren. Die Charakterisierung der Entscheidungssituation im Unterkapitel 4.1 <sup>S. 59</sup> lässt erahnen, dass diese Vorgehensweise zu einer recht komplexen Problemformulierung führen kann. Zwar ist die Entwicklung von Optimierungsverfahren und leistungsstarker Rechentechnik weit vorangeschritten, der Größe des Optimierungsproblems sind jedoch mit Blick auf akzeptable Laufzeiten der Lösungsalgorithmen nach wie vor Grenzen gesetzt [82 <sup>S. 126</sup>/206 <sup>S. 198</sup>].

Welches Optimierungsverfahren sich für das zu entwickelnde Entscheidungsmodell eignet, ist im Wesentlichen von der Art der Problemformulierung abhängig. Hierfür sind zunächst generelle Überlegungen zur Modellgestaltung vorzunehmen. Diese tangieren die Modellierung der einzelnen Entscheidungsaspekte und vor allem die Frage, welche Freiheitsgrade der Entscheidungssituation endogen, d. h. als Variablen des Optimierungsproblems berücksichtigt werden sollen. Damit eng verknüpft ist die Überlegung, ob das Problem linear oder nichtlinear formuliert wird und welche der Entscheidungsgrößen kontinuierlich oder diskret zu betrachten sind. Die daraus resultierende Problemgröße ist im Zusammenhang mit der Auswahl eines geeigneten Optimierungsverfahrens hinsichtlich des Rechenaufwandes und der zu erwartenden Ergebnisgüte abzuwägen.

### 4.5.1 Abbildung der techno-ökonomischen Entscheidungsaspekte

Auch wenn die Zusammenstellung des Maßnahmenbündels durch das Modell übernommen wird, wäre der Aufwand zur Vorgabe vollständig parametrierter Einzelanlagen und Dämmvarianten noch sehr hoch. Ein geeigneter Ansatz besteht darin, die technischen *System(gestaltungs)optionen* für das Gebäudeenergiesystem als Kategorien zu definieren, die jeweils viele typenidentische Einzelanlagen und Bauteile reprä-

sentieren. Diese Vorgehensweise erscheint für das zu entwickelnde Modell sinnvoll und wird auch bei vielen der vorgestellten Gebäudeoptimierungsmodelle angewandt. Die Differenzierung der Systemoptionen soll anhand der Funktion, der verwendeten Technologie und der gegebenenfalls eingesetzten Energieträger vorgenommen werden. So stellen bspw. ein Niedertemperaturgaskessel, ein Brennwertgaskessel, ein Brennwertölkessel sowie die Dämmung der opaken Gebäudehülle vier verschiedene Systemoptionen dar. Als zusätzliches Merkmal könnte aber auch die räumliche Trennung herangezogen werden, sodass die Dämmungen der opaken Hüllflächen Dach, Außenwand und Kellerdecke separat zu betrachten sind.

Den abgebildeten Systemoptionen werden vier miteinander eng verknüpfte Modellentscheidungsgrößen (Variablen) zugeordnet. Die erste Variable repräsentiert die *Zustandsausprägung* der Option zu einem bestimmten Zeitpunkt innerhalb des Analysezeitraums. Die zweite und die dritte Entscheidungsgröße geben Auskunft über die Änderung der Zustandsausprägung (*Änderungsausprägung* der Option – differenziert nach Zubau bzw. Erweiterung und Rückbau bzw. Reduktion). Sie repräsentieren damit die konkreten Maßnahmen, deren Umsetzung zu einem bestimmten Zeitpunkt zu empfehlen ist. Die vierte Variable stellt den zeitlichen Einsatz einer Systemoption dar. Da die Einsatzentscheidung nur für Energiespeicher- und Energieumwandlungsanlagen mit modulierbarem bzw. unterbrechbarem Betrieb relevant ist, wird im Folgenden der Begriff *Anlageneinsatz* für diese Entscheidungsgröße verwendet.

Die Ausprägungsentscheidungen sollen jeweils auf einer technischen bzw. energetischen Kenngröße beruhen, wie bspw. der Nennleistung eines Wärmeerzeugers, der Speicherkapazität eines Wärmespeichers oder der U-Wert eines Wandaufbaus. Ein Brennwertgaskessel mit 24 kW Nennleistungsabgabe und ein Brennwertgaskessel mit 36 kW Nennleistungsabgabe stellen damit zwei verschiedene Zustandsausprägungen der Systemoption „Brennwertgaskessel“ dar. Die Summe aller Änderungsausprägungen zu einem Umsetzungszeitpunkt repräsentiert ein Maßnahmenbündel. Ein „leeres“ Maßnahmenbündel, d. h. die Beibehaltung aller Zustandsausprägungen, ist als Wahl der Unterlassungsalternative zu interpretieren. Die Anlageneinsatzentscheidung wird durch die Energieabgabe bzw. Energiespeicherung der einzelnen Systemoptionen in jedem Modellzeitschritt bestimmt.

Die obere Schranke der Zustandsausprägung wird durch technische bzw. räumliche Gegebenheiten gesetzt. Beispielsweise ist die Größe einer PV-Anlage durch die zur Verfügung stehende Dachfläche begrenzt. Die untere Schranke entspricht der Nichtnutzung der Systemoption bzw. dem vollständigen Rückbau einer Bestandsanlage. Darüber hinaus können technische und rechtliche Schranken bestehen, die den möglichen Änderungsausprägungsbereich einengen. So könnte beim Zubau eines Wärmeerzeugers eine technisch bedingte Mindestleistung zu beachten sein oder gesetzliche

Regelungen fordern eine Mindestausprägung, falls die Maßnahme umgesetzt wird. Die mögliche Energieabgabe bzw. das Energiespeichervermögen einer Anlage wird durch ihre Zustandsausprägung beschränkt.

Eine analoge Vorgehensweise wird zur Modellierung der ökonomischen Entscheidungen genutzt, deren Ausprägungen zusammen mit dem Maßnahmenbündel letztendlich die vollständigen Alternativen der Entscheidungssituation bilden. Tabelle 6 gibt einen Überblick zu den wesentlichen vorgesehenen Modellentscheidungsgrößen.

**Tabelle 6:** Wesentliche Modellentscheidungsgrößen (Variablen)

		Handlungsoptionen	Modellentscheidungsgröße	Betrachtung
technisch	Wärme- und Stromerzeugung	Zubau/Rückbau Solaranlagen	Kollektorfläche	kontinuierlich oder diskret
		Zubau/Rückbau sonstige Energieumwandlungsanlagen	Energieabgabeleistung/Kapazität	kontinuierlich oder diskret
		Anlageneinsatz/-steuerung	Wärme-/Stromabgabe	kontinuierlich
	Energiespeicher	Zubau/Rückbau Wärmespeicher	Speichermasse bzw. Speichervolumen	kontinuierlich oder diskret
		Zubau/Rückbau Stromspeicher	Speicherkapazität	kontinuierlich oder diskret
		Anlageneinsatz/-steuerung	Energiespeicherung und Energieabgabe	kontinuierlich
	Wärmeverteilung	Zubau/Rückbau von Dämmvarianten für Rohrleitungen	Dämmdicke und Wärmeleitfähigkeit	diskret
	Heizwärmerückgewinnung	Zubau/Rückbau von Lüftungsanlagen mit Wärmerückgewinnung	Wärmebedarfsreduktion	diskret
	Gebäudehülle	Zubau/Rückbau von Dämmungen für opake Flächen	Wärmedurchgangskoeffizient	kontinuierlich
		Zubau/Rückbau von Fenstervarianten (U-Wert/g-Wert)	U-Wert und g-Wert	diskret
ökonomisch	Eigenkapital	Maßnahmenfinanzierung oder alternative Mittelverwendung	Volumen	kontinuierlich
	Fremdkapital	Inanspruchnahme einzelner Kreditvarianten	Volumen	kontinuierlich
	Gebäudebewirtschaftung	Mietpreiserhöhung	Mietpreisanpassung	kontinuierlich
			Modernisierungsumlage	kontinuierlich
	Bewirtschaftung PV- und KWK-Anlagen	Eigennutzung	Energiemenge	kontinuierlich
		Netzeinspeisung	Energiemenge	kontinuierlich
Abschluss Lieferverträge		Energiemenge und -preis	diskret	

### 4.5.2 Art der Problemformulierung und Auswahl des Lösungsverfahrens

Tabelle 6 zeigt, dass die Betrachtung der technischen und ökonomischen Entscheidungen vorzugsweise kontinuierlich erfolgt. Hieraus ergibt sich eine unendliche Menge an Maßnahmenbündeln und finanziellen Gestaltungsmöglichkeiten, die in die Analyse einbezogen werden können. Diese Vorgehensweise kann aus Praxissicht durchaus in Frage gestellt werden, da am Markt in der Regel nur bestimmte Ausprägungen (bspw. Wärmeerzeugerleistungen) verfügbar sind. Eine angebotskonforme diskrete Modellierung soll zwar ermöglicht werden, allerdings erhöht diese die Problemgröße. Für einige Systemoptionen, wie bspw. Fenster, ist generell eine diskrete Betrachtung vorzusehen, da die Ausprägung konstruktionsbedingt nur sehr sprunghaft variiert werden kann. Gleiches gilt für den Rückbau von nicht modular aufgebauten Bestandsanlagen.

Aus der differenzierten Erfassung der einzelnen Entscheidungsaspekte ergeben sich hohe Anforderungen an die Modellierung ihrer Beziehungsstruktur, welche die Wechselwirkungen zwischen ihnen widerspiegeln muss. Auf technischer Seite betrifft das in erster Linie die aufeinander abzustimmenden Zustandsausprägungen in Verbindung mit dem Einsatz der technischen Systemoptionen. Diese Beziehungsstruktur weist in der Realität eine Reihe von Nichtlinearitäten auf, sodass im Sinne einer hohen Realitätsnähe auch eine nichtlineare Problemformulierung erwogen werden könnte.

Der Literaturüberblick zeigt zwei grundlegend verschiedene Möglichkeiten zur nicht-linearen Betrachtung der Systemgestaltung und des Anlageneinsatzes auf (siehe Abschnitte 4.2.2 <sup>S. 71</sup> und 4.2.3 <sup>S. 73</sup>). Die Verknüpfung eines Optimierungsprogramms mit einem Gebäudesimulationstool erlaubt eine sehr detaillierte Erfassung der technischen Zusammenhänge. Um die ökonomischen Entscheidungsaspekte und die Rahmenbedingungen des Eigentümers mit den gesetzten Anforderungen in die Analyse einzubeziehen, wäre die Implementierung eines umfangreichen Restriktionensystems in das angekoppelte Optimierungstool notwendig. Hierbei könnte sich ein Nachteil der simulationsgekoppelten Vorgehensweise als problematisch erweisen. Dieser ist darin zu sehen, dass zwischen den technischen Entscheidungsvariablen als Eingangsgrößen der Simulation und den Zielgrößen, welche direkt oder indirekt aus den Simulationsergebnissen abgeleitet werden, für den Optimierungsalgorithmus kein unmittelbarer Zusammenhang besteht. Das Simulationstool stellt in Form einer „Black Box“ eine sehr komplexe explizite Nebenbedingung dar und die ökonomisch-rechtliche Zulässigkeit einer möglichen technischen Systemgestaltungsalternative kann immer erst nach einem Simulationslauf geprüft werden [252 <sup>S. 292</sup>]. Da die simulationsbasierten Ansätze

zur Approximation einer optimalen Lösung mitunter eine sehr große Anzahl<sup>82</sup> an Simulationsläufen erfordern, wird im Allgemeinen empfohlen, auf umfangreiche Nebenbedingungen im angekoppelten Optimierungstool zu verzichten [252 S. 293]. Hierin dürfte auch ein wesentlicher Grund zu sehen sein, weshalb sich diese Modelle vor allem auf Zielgrößen wie den Gebäudeenergiebedarf oder die Energienutzungsausgaben fokussieren, welche aus den Simulationsergebnissen einfach und direkt abgeleitet werden können.

Die eben beschriebene Problematik besteht für die zweite im Schrifttum vorgestellte Optimierungsmodellgruppe nicht, da sich diese Ansätze ausschließlich auf implizite Restriktionensysteme ohne integrierte Gebäudesimulation stützen. Derartige nicht-lineare Ansätze, welche auch die Einsatzentscheidung für die energiebereitstellenden Anlagen adäquat in die Analyse einbeziehen können, basieren vorrangig auf der mathematischen Programmierung mit exakten Lösungsverfahren. Im Unterschied zu den simulationsbasierten Ansätzen mit heuristischen Lösungsverfahren sind sie deshalb auch in der Lage, eine globaloptimale Lösung – sofern existent – garantiert ermitteln zu können [82 S. 127]. Die vorgesehene Verknüpfung der technischen mit den finanziellen, steuerlichen, rechtlichen und marktbedingten Einflussgrößen ist allerdings von Abhängigkeiten gekennzeichnet, welche sich im Gegensatz zu den meisten technischen und ökonomischen Entscheidungsgrößen mit einer kontinuierlichen Betrachtungsweise nicht sinnvoll berücksichtigen lassen. Der Grund sind die sprunghaften Änderungen der gültigen Rahmenbedingungen für einzelne Systemzustände. Bereits kontinuierliche nichtlineare Optimierungsprobleme gelten im Allgemeinen als schwer lösbar, insbesondere dann, wenn die Nichtlinearitäten in den Nebenbedingungen vorliegen [204 S. 536]. Für die betrachtete Entscheidungssituation ist das der Fall. Das verstärkte Auftreten von ganzzahligen Modellvariablen steigert die Komplexität in der Regel nochmals erheblich.

Mit Blick auf die eben geführte Diskussion wird für das zu entwickelnde Modell eine gemischt-ganzzahlige lineare Problemformulierung (*Mixed Integer Linear Program – MILP*) gewählt, wobei relevante nichtlineare Zusammenhänge in angemessener Weise linear approximiert werden sollen. Obwohl diese Art der Problemformulierung im Schrifttum zur energetischen Gebäudeplanung bislang kaum vertreten ist, zeigt der von GUSTAFFSON [124] beschriebene Modellansatz, dass sie sich zur sinnvollen Analyse der zu betrachteten Entscheidungssituation eignet. Auch lineare Optimierungsprobleme mit ganzzahligen Entscheidungsgrößen weisen einen hohen Komplexitätsgrad auf. Allerdings stehen hierfür inzwischen leistungsfähige Lösungsverfahren zur Verfügung.

---

<sup>82</sup> PEIPPO ET AL. [212] geben für ihr Modell bspw. 5.000-10.000 erforderliche Simulationsläufe bei 30 technischen Entscheidungsgrößen an.

Aufgrund der Tatsache, dass bislang kein effizienter Lösungsalgorithmus für derartige Optimierungsprobleme gefunden werden konnte [82<sup>s. 127</sup>/206<sup>s. 201</sup>], besteht aber dennoch die Gefahr, dass bei einer großen Anzahl diskreter Variablen eine Lösung mit vertretbarem Rechenzeitaufwand unmöglich ist. Das könnte unter Umständen auch auf die abzubildende Entscheidungssituation zutreffen, nicht zuletzt deshalb, weil die Approximation nichtlinearer Zusammenhänge die Anzahl der erforderlichen Ganzzahligkeitsbedingungen in der Regel erheblich erhöht. In diesem Fall wäre der Einsatz einer Heuristik notwendig. Diese kann in der Lage sein, relativ schnell eine zulässige Lösung zu präsentieren. Generell ist bei der alleinigen Anwendung einer Heuristik aber negativ zu bewerten, dass sich die Abweichung der gefundenen Lösung vom Optimum nicht ohne weiteres schätzen lässt [288<sup>s. 150</sup>]. Daher ist nicht zu erkennen, inwiefern eine gefundene Lösung suboptimal ist oder ob es sich bei ihr sogar um das Optimum handelt [237<sup>s. 62</sup>].

Für das zu entwickelnde Entscheidungsmodell wird auf das *Branch-and-Cut*-Verfahren zurückgegriffen, welches bereits für anspruchsvolle MILP mit akzeptablen Laufzeiten zur Lösungsfindung erfolgreich angewandt werden konnte [204<sup>s. 534</sup>]. Als exaktes Verfahren ermöglicht es einerseits die Bestimmung der optimalen Lösung. Andererseits ist das Verfahren auch als Heuristik einsetzbar, indem es unvollständig durchgeführt wird [82<sup>s. 128</sup>]. So kann oftmals relativ schnell eine sehr gute und gegebenenfalls bereits die optimale Lösung bestimmt werden, da nicht selten ein Großteil des MILP-Rechenaufwandes auf den vollständigen Nachweis entfällt, dass es sich bei der besten gefundenen Lösung auch wirklich um das Optimum handelt [287<sup>s. 259</sup>]. Die Güte der besten gefundenen ganzzahligen Lösung beim unvollständig durchgeführten *Branch-and-Cut*-Verfahren lässt sich anhand der Abweichung zum theoretischen Optimum bewerten, welches durch das Lösen der LP-Relaxation des MILP mithilfe des *Simplex*-Algorithmus ermittelbar ist [206<sup>s. 234</sup>].

Zur Umsetzung dieser Vorgehensweise bieten kommerziell verfügbare Solver einen hohen Komfort. Durch das Lösen der LP-Relaxation können sie im Rahmen des *Branch-and-Cut*-Verfahrens die Güte der gefundenen zulässigen Lösungen unmittelbar beurteilen. Gleichzeitig erlauben sie es, bezüglich dieses Gütekriteriums Abbruchkriterien zu definieren und die bis dahin beste gefundene Lösung auszugeben. Darüber hinaus sind die Solver in der Lage, mit einer Vorabanalyse die Komplexität des Problems durch dessen Neuformulierung zu reduzieren, bspw. durch Eliminierung redundanter Nebenbedingungen, die sich unter Umständen anwendungsfallspezifisch ergeben können. Zusätzlich nutzen sie Heuristiken, um das *Branch-and-Cut*-Verfahren möglichst effektiv einzusetzen. Nicht zuletzt auch aus diesen Gründen wird für das zu entwickelnde Entscheidungsmodell ein kommerziell verfügbarer Solver genutzt.

### 4.5.3 Abbildung der techno-ökonomischen Beziehungsstrukturen

Für die Untersuchung strategischer Fragestellungen zur Energieversorgungssicherheit, die im Zuge der Ölpreiskrisen in einigen Industriestaaten aufkamen, wurde in den 1970er-Jahren die Entwicklung optimierender systemanalytischer Ansätze vorangetrieben. Die daraus entstandenen Modelle bilden in der Regel die reale energetische Wertschöpfungskette von den Ressourcen über die Energiebereitstellung bis zur Energienachfrage auf Basis der zugrundeliegenden Energie- bzw. Stoffflüsse nach. Bekannte Modelle sind bspw. *EFOM*, *MARKAL* und *MESSAGE*.<sup>83</sup> Mit dem Fokus auf neue Themenfelder (insbesondere zum Umweltschutz) und Anpassungen an geänderte Rahmenbedingungen (bspw. die Energiemarktliberalisierung) wurden die Ansätze in den letzten Jahrzehnten kontinuierlich weiterentwickelt. Im Laufe der Zeit hat sich dadurch eine Vielzahl neuer eigenständiger Modellansätze herausgebildet.<sup>84</sup>

Eine auf dem *EFOM* basierende Weiterentwicklung ist die *PERSEUS*-Modellgruppe.<sup>85</sup> Alle Modellvarianten dieser Gruppe stellen techno-ökonomische Optimierungsansätze dar, mit denen vorrangig Fragen zur zukünftigen Gestaltung der Elektroenergieversorgung von der europäischen bis hinab zur lokalen Ebene untersucht werden. Aufgrund der strukturellen Ähnlichkeit dieser Energiesystemanalysen mit dem Betrachtungsgegenstand der vorliegenden Arbeit soll geprüft werden, ob sich hieraus ein geeigneter Ausgangspunkt für die Modellentwicklung ergibt. Zunächst erfolgt eine kurze Beschreibung der grundlegenden Methode dieser Analyseinstrumente, deren mathematische Problemformulierung in der Programmiersprache *GAMS*<sup>86</sup> umgesetzt ist.

#### 4.5.3.1 Der *PERSEUS*-Analyseansatz

Der techno-ökonomische Analyseansatz der *PERSEUS*-Modelle ist auf die Identifikation von ausgabenminimalen Entwicklungspfaden für das untersuchte Energiesystem innerhalb eines langfristigen, in mehrere Perioden gegliederten Betrachtungszeitraums ausgerichtet. Das Versorgungssystem wird hierfür als gerichteter Graph abgebildet, dessen Kanten die Energieflüsse und dessen Knoten die einzelnen Stufen der Versorgungsketten repräsentieren. Diese sind grob in die Bereiche Energieumwandlung, -verteilung und -nutzung untergliedert.

---

<sup>83</sup> *EFOM* – Energy Flow Optimization Model [102]. *MARKAL* – Market Allocation Model [103]. *MESSAGE* – Model for Energy Supply System Alternatives and their General Environmental Impact [6].

<sup>84</sup> Vgl. bspw. [105–109/201/131/72/195/196/241/260/261]. Ein Überblick zu weiteren Modellen und Publikationen findet sich u. a. in [169/215].

<sup>85</sup> Die *PERSEUS*-Modellgruppe (*Programme Package for Emission Reductions Strategies in Energy Use and Supply*) wurde am *INSTITUT FÜR INDUSTRIEBETRIEBSLEHRE UND INDUSTRIELLE PRODUKTION (IIP)* des *Karlsruher Instituts für Technologie (KIT)* erarbeitet. Vgl. u. a. [116<sup>s. 15</sup>/200<sup>s. 79 f.</sup>/114].

<sup>86</sup> *General Algebraic Modelling System* [48].

Als Modelltreiber werden periodisierte Energienutzungen exogen definiert, die zur Berücksichtigung der Laststrukturen auf unterjährige Zeitabschnitte heruntergebrochen werden. Zur Nachfragebefriedigung sind die am Startpunkt des betrachteten Versorgungssystems verfügbaren Ressourcen bzw. Energieträger in die benötigten Energieformen zu überführen und auf der Nutzungsseite bereitzustellen. Dazu können verschiedene Technologiekategorien mit entsprechenden Energieumwandlungsprozessen genutzt werden, die in den Knoten der Graphenstruktur zu modellieren sind. Diesen Systemgestaltungsoptionen werden spezifische technische, ökonomische und gegebenenfalls auch umweltrelevante Parameter hinterlegt. Die technischen Charakteristika beschreiben realitätsnah die Einsatzmöglichkeiten der einzelnen Technologien sowie die Bedingungen der Energieumwandlung und -verteilung. Dagegen bilden die ökonomischen Parameter die Grundlage zur Erfassung der entstehenden monetären Konsequenzen aus der Systemgestaltung.

Die Entscheidungsfindung der *PERSEUS*-Modelle basiert in der Regel auf der linearen (fallweise gemischt-ganzzahligen) Optimierung. Wichtige Entscheidungsgrößen sind die Energieflusslevel, die Aktivitätsniveaus der Umwandlungsprozesse und die Entwicklung der Anlagenkapazitäten innerhalb der Technologiekategorien. Als die zu minimierende Zielgröße ist die auf das Startjahr des Analysezeitraums bezogene Summe der Systemausgabenbarwerte definiert. Die Systemausgaben umfassen die notwendigen Anfangsauszahlungen zur Änderung der Versorgungsstruktur, welche als periodisierte Ausgabengröße (Annuität) auf die Nutzungsdauer der jeweiligen Anlagen im Analysezeitraum verteilt werden.<sup>87</sup> Hinzu kommen die Periodenausgaben zur Energiebereitstellung auf der Nachfrageseite u. a. für die Brennstoffe, den Energietransport und den Anlagenbetrieb. Da die Ausgaben verschiedener Produzenten, Distributoren und Abnehmer bzw. Konsumenten gleichwertig in die Zielfunktion eingehen, unterliegt dem Analyseinstrument ein normativer Ansatz, der alle Systemgestaltungsoptionen einem einheitlichen wirtschaftlichen Bewertungsmaßstab unterwirft [100<sup>s. 89</sup>]. Die Modellentscheidungen können somit nicht die realen Handlungsmotive und Entscheidungsgrundlagen der verschiedenen Akteure innerhalb des betrachteten Versorgungssystems berücksichtigen, sondern basieren auf einer an die gesamtwirtschaftliche Perspektive angelehnten Sichtweise.<sup>88</sup> Hauptadressaten der

---

<sup>87</sup> Durch die Erfassung der Anfangsauszahlungen als Periodenausgaben über die Anlagenutzungsdauer gehen in die Zielfunktion nur die Anteile der Anfangsauszahlungen ein, die dem Analysezeitraum zuzurechnen sind. Somit werden ausschließlich periodisierte Größen betrachtet und auf die Bewertung der ökonomischen Konsequenzen außerhalb des abgebildeten Analysezeitraums kann verzichtet werden.

<sup>88</sup> Produktion, Distribution, Konsum bzw. Abnahme und Umwelteinflüsse werden als Elemente bzw. Auswirkungen des Energieversorgungssystems integriert betrachtet. Weitere aus gesamtwirtschaftlicher Sicht relevante Wechselwirkungen, bspw. mit anderen Wirtschaftszweigen, zur Beschäftigungsentwicklung oder bezüglich der Steuereinnahmen, bleiben in der Regel aber unberücksichtigt.

Analysen sind deshalb politische Entscheidungsträger, denen damit bspw. Informationen für den Entwurf und die Bewertung von umwelt- und energiepolitischen Instrumenten bereitgestellt werden können.

Das formale Grundgerüst aller *PERSEUS*-Modelle bilden Energiebilanzgleichungen und Kapazitätsungleichungen, welche einerseits die Einhaltung der Wirkungsketten im Energieflussgraphen und andererseits die Bereitstellung der Anlagenkapazitäten zur Deckung der Energienachfrage sicherstellen. Durch die Bilanzgleichungen wird an jedem Knoten des Netzwerkes – unter Berücksichtigung der in ihnen erfolgenden Energietransformation – das energetische Gleichgewicht zwischen den Zu- und Abflüssen innerhalb eines betrachteten Zeitabschnitts gewahrt. Die Aktivitätsvariablen der Prozesse und Flüsse umfassen gleichzeitig die Modellentscheidungen hinsichtlich des Energieträgereinsatzes und der Energieweiterleitung bzw. -verteilung. Die Prozessaktivität beinhaltet zusätzlich die Entscheidungen zum zeitlich differenzierten Einsatz der Anlagen. Die erforderliche Kapazität einer Anlage ergibt sich aus der maximalen Leistungsabgabe der ihr zugewiesenen Umwandlungsprozesse. Durch die Erweiterung oder den Rückbau von Bestandsanlagen sowie den Zubau neuer Anlagen innerhalb der vorgegebenen Technologiearten repräsentieren die Kapazitätsvariablen die Modellentscheidung zur Entwicklung der technischen Systemstruktur.

Dieses mathematische Grundgerüst wird je nach Anwendungsfall und Untersuchungsgegenstand um zusätzliche Nebenbedingungen ergänzt, welche den Einbezug weiterer systemtechnischer Gegebenheiten aber auch politischer Vorgaben und rechtlicher Rahmenbedingungen ermöglichen. Modellanwendungen der jüngeren Vergangenheit werden bspw. in [93/94/138] beschrieben.

#### 4.5.3.2 Zur Übertragbarkeit des *PERSEUS*-Analyseansatzes

Die Modellierungsmethode der *PERSEUS*-Modelle ist zur Abbildung der technischen Gegebenheiten für das zu erstellende Analyseinstrument offensichtlich geeignet. Durch die Verwendung eines Energieflussgraphen können die vorhandenen Wechselwirkungen der Systemgestaltungsoptionen entlang der gebäudeinternen Versorgungskette aber auch zwischen den Elementen auf den einzelnen Stufen in zweckmäßiger Weise berücksichtigt werden. Der in Relation zur Untersuchung übergeordneter Versorgungsstrukturen erheblich geringere Systemumfang erlaubt zugleich einen höheren Detaillierungsgrad bei der Betrachtung der technischen Wirkungsbeziehungen. So können bspw. die Technologien zur Beeinflussung des Nutzenergiebedarfs und ihr Zusammenspiel mit der Energiebereitstellungsseite differenziert in

die Untersuchung einbezogen werden.<sup>89</sup> Gleichzeitig ist eine nicht zu unterschätzende Stärke des Ansatzes in seiner Anwendungsflexibilität zu sehen. Die Verwendung von standardisierten Abbildungselementen mit separater Parametrierung gewährleistet eine hohe Anpassungsfähigkeit an verschiedene Entscheidungssituationen und Ausgangslagen.

Darüber hinaus bietet der *PERSEUS*-Analyseansatz bereits fast alle Voraussetzungen zur Alternativenbewertung für die Zielgröße „Primärenergiebedarf“ (vgl. Unterkapitel 4.4 S. 81). Bei den relevanten Energieträgeranteilen handelt es sich ausschließlich um solche, die von externen Versorgern bezogen werden. Dieser Energiebezug ist lediglich mit den dazugehörigen Primärenergiefaktoren zu multiplizieren und mithilfe einer entsprechenden Zielfunktion zu minimieren. Umfangreichere Ergänzungen sind im Hinblick auf den angestrebten Detaillierungsgrad bei der Abbildung der Systemgestaltungsoptionen und des Anlageneinsatzes erforderlich. Hierfür sind neue adäquate Modellierungsmethoden bzw. Abbildungselemente zu entwickeln.

Eine weitere Anpassung betrifft die Strukturierung des Analysezeitraums. Energiesystemmodellen für überregionale Versorgungsstrukturen unterliegt zur Reduktion der Problemgröße oftmals eine abstrahierte Zeitstruktur mit wenigen Stützjahren und einer stark vereinfachten Typtag-Darstellung der unterjährigen Energieinanspruchnahme. Bei den *PERSEUS*-Modellen stellen die Stützjahre gleichzeitig auch immer mögliche Umsetzungszeitpunkte für Änderungen an der Systemstruktur dar. Zwar ist diese Abbildungsmethode für den geplanten Anwendungsfall prinzipiell geeignet, allerdings soll von dieser Vorgehensweise durch die Kennzeichnung einzelner Modelljahre als mögliche Zeitpunkte zur Maßnahmenumsetzung etwas abgewichen werden. Die Problemgrößenreduktion kann somit flexibel und anwendungsfallspezifisch durch die Beschränkung der Handlungszeitpunkte auf die gewünschte Anzahl erreicht werden, ohne auf eine detaillierte jährliche Erfassung der Entscheidungskonsequenzen verzichten zu müssen. Bei der Vorgabe einer groben Stützjahrstruktur mit langen, nicht differenziert betrachteten Zwischenzeiträumen wäre das dagegen der Fall.

Obwohl der *PERSEUS*-Analyseansatz auch die Erfassung der ökonomischen Auswirkungen der Systemgestaltung leistet, wird schnell deutlich, dass die zugrundeliegende Bewertungsmethode die Anforderungen für den geplanten Anwendungsfall nicht

---

<sup>89</sup> Aufgrund des ursprünglichen Anwendungsfokus der *PERSEUS*-Modelle auf Fragestellungen zur Gestaltung der Energiebereitstellungsseite blieben Optionen zur Reduktion des Energiebedarfs auf der Energienutzungsseite lange Zeit weitgehend unberücksichtigt. Inzwischen werden aber zunehmend auch Technologien, welche den Energiebedarf beeinflussen und die in den Entscheidungsbereich der Konsumenten fallen, in die Modellanwendungen einbezogen. Aufgrund der zu beschränkenden Optimierungsproblemgröße können diese in der Regel nur mit reduziertem Umfang und stark vereinfacht berücksichtigt werden.

befriedigen kann. Dies liegt u. a. darin begründet, dass sich die eingenommene gesellschaftliche Perspektive der *PERSEUS*-Modelle nicht ohne weiteres auf die Sichtweise eines Investors übertragen lässt. Der gesellschaftliche Blickwinkel rechtfertigt, die Systemgestaltung zur Gewährleistung der Energiebedarfsdeckung allein an der Minimierung der dafür erforderlichen Ausgaben auszurichten und gleichzeitig die ökonomischen Handlungsmotive und Belange einzelner Wirtschaftssubjekte auszublenden. Für die Investitionsentscheidung einzelner Akteure ist die ausschließliche Betrachtung der Ausgabenseite als Bewertungsgrundlage jedoch kritisch zu hinterfragen.

Mit der Übertragbarkeit der Analyseverfahren auf die Sichtweise eines einzelnen, an Gewinngrößen orientierten Investors setzen sich *FICHTNER* [100] und *GÖBELT* [116] auseinander. In beiden Arbeiten wird ein *PERSEUS*-Modell zur strategischen Entscheidungsunterstützung eines Energieversorgungsunternehmens (EVU) herangezogen. *FICHTNER* stützt seine Analysen auf die ausgabenexklusive Betrachtung und argumentiert, dass für eine gewinnorientierte Handlungsweise die Ausgabenminimierung zielführend ist, sofern die Einnahmen durch die Investitionsentscheidung nicht beeinflusst werden können.<sup>90</sup> Diese Sichtweise wäre bei der Entscheidungsfindung eines Gebäudeeigentümers grundsätzlich vertretbar. Beschränkt sich die Analyse auf die Befriedigung seiner Anforderungen an die Gebäudenutzbarkeit, d. h. der Wohnraum ist ausreichend beheizt, Warmwasser ist im erforderlichen Umfang vorhanden und die elektrische Energieversorgung erfolgt ausschließlich durch Fremdanbieter, ist der ausgabenminimierende Ansatz hinsichtlich einer Gewinnmaximierung für den Eigentümer zielführend.

Für die Entscheidungssituation eines Vermieters greift diese Vorgehensweise allerdings zu kurz, da hier die getätigten Investitionen einen Einfluss auf die Einnahmenseite haben. Gleiches gilt für einen Gebäudeeigentümer, welcher die Bewirtschaftung einer KWK- bzw. PV-Anlage in Erwägung zieht. In beiden Fällen könnte eine Erhöhung der Ausgaben zusätzliche Einnahmen generieren, die in Summe zu einem höheren Gewinn für den Investor führen. Die Berücksichtigung der Einnahmenseite ist deshalb zwingend in das ökonomische Bewertungsschema zu integrieren. Eine dahin gehende Modifikation des *PERSEUS*-Analyseansatzes nimmt *GÖBELT* in seiner Arbeit vor und untersucht die von ihm betrachtete EVU-Entscheidungssituation mit dem Ziel einer Gewinnmaximierung für entscheidungsabhängige Einnahmen.<sup>91</sup> Dennoch ist sein

---

<sup>90</sup> *FICHTNER* [100] untersucht die Entscheidungssituation unter den Bedingungen eines regulierten Energiemarktes mit Monopolstellung des EVU's im zugeordneten Versorgungsgebiet. Unter vernachlässigbaren Preiselastizitäten kann in diesem Fall die Unabhängigkeit des Energieabsatzes von den Investitionsentscheidungen des EVU's unterstellt werden.

<sup>91</sup> Im Gegensatz zu *FICHTNER* [100] untersucht *GÖBELT* [116] die Entscheidungssituation eines EVU's unter den Bedingungen des liberalisierten Energiemarktes, in dem die Unabhängigkeit des Energieabsatzes von den Investitionsentscheidungen des EVU's nicht mehr vereinfachend unterstellt werden kann.

Ansatz für den geplanten Modelleinsatz ungeeignet. Der Grund ist in dem von ihm implementierten Bewertungsverfahren zu sehen, welches den Anforderungen an das zu entwickelnde Analyseinstrument nicht vollständig gerecht werden kann. Diese Diskussion wird im Abschnitt 4.6.2<sup>s. 99</sup> weiter vertieft.

Die akteursunabhängige Perspektive des *PERSEUS*-Analyseansatzes bedingt eine weitere notwendige Neuentwicklung für die zu untersuchende Modernisierungsentscheidung, welche die Erfassung verschiedener Investoren betrifft. Dieser Aspekt bleibt auch in den Arbeiten von *FICHTNER* und *GÖBELT* unberücksichtigt, da sie lediglich den Einflussbereich eines einzelnen Investors betrachten. Das zu entwickelnde Modell soll dagegen in der Lage sein, die Entscheidungssituation aus dem Blickwinkel einer Eigentümergemeinschaft mit mehreren Entscheidungsträgern zu beleuchten. Diese können aufgrund heterogener Rahmenbedingungen und der unterschiedlichen Partizipation an der Gebäudemodernisierung durchaus zu einer abweichenden Beurteilung ein und derselben Maßnahme gelangen. Neben der Zuordnung einzelner Investitionsanteile ist deshalb die Erfassung der Entscheidungstendenz jedes Teileigentümers erforderlich, die letztendlich in die zu treffende einheitliche Entscheidung der Eigentümergemeinschaft zur Umsetzung von Modernisierungsmaßnahmen einfließt.

Zusammenfassend ist festzustellen, dass die Modellierung mithilfe eines Energieflussgraphen zur Darstellung der technischen Entscheidungsaspekte und deren Wirkungsbeziehungen für das zu entwickelnde Modell geeignet ist. Die dafür notwendigen mathematischen Formulierungen können mit geringem Anpassungsaufwand für das zu entwickelnde Entscheidungsmodell aus dem *PERSEUS*-Analyseansatz übernommen werden. Darüber hinaus ist der Ansatz allerdings nicht in der Lage, die gestellten Anforderungen an die Betrachtung der Modernisierungsentscheidung zu befriedigen. Aufbauend auf den formalen Grundbausteinen zur Abbildung des Energieflussgraphen ist deshalb die Entwicklung eines neuen Analyseinstruments notwendig, das den gestellten Ansprüchen gerecht wird. Hierfür ist ein adäquates Restriktionensystem zu erarbeiten, welches die relevanten Entscheidungsgrundlagen und die spezifischen Rahmenbedingungen für die verschiedenen Eigentümerrollen (Vermieter, Selbstnutzer und KWK-/PV-Anlagenbetreiber) beschreibt. Wesentliche Herausforderungen sind die Modellierung der technischen Handlungsoptionen, die keine Energieumwandlungsanlagen darstellen, sowie die Berücksichtigung der Wechselwirkungen zwischen den Maßnahmen der Energiebereitstellungs- und der Energienutzungsseite. Gleiches gilt für die Erfassung und Bewertung der ökonomischen Entscheidungskonsequenzen unter Berücksichtigung der Finanzierungsmittelwahl und der steuerrechtlichen Aspekte. Letztere Punkte erfordern die Implementierung eines neuen Bewertungsschemas. Die Vorüberlegungen dazu werden im folgenden Unterkapitel vorgenommen.

## 4.6 Vorüberlegungen zum ökonomischen Bewertungsschema für das zu entwickelnde Modell

Die monetäre Bewertung der Maßnahmenwahl steht im Mittelpunkt der Gewinnzielsetzung und stellt gleichzeitig eine Nebenbedingung bei der Zielsetzung zur Minimierung des Primärenergiebedarfs dar, da in diesem Fall die Maßnahmenwirtschaftlichkeit gewährleistet sein soll. Die Vorüberlegungen zum ökonomischen Bewertungsschema werden im Abschnitt 4.6.1 mit einer Charakterisierung der betrachteten Problemstruktur aus Sicht der Investitionsrechnung eingeleitet. Für die Beurteilung der monetären Konsequenzen einer Entscheidung bietet die Investitionsrechnung verschiedene Verfahren. Diese divergieren u. a. hinsichtlich der betrachteten Entscheidungsfreiheitsgrade und der unterstellten Rahmenbedingungen für den Investor. Die geeignete Methode für das zu entwickelnde Modell wird im Abschnitt 4.6.2<sup>s. 99</sup> erörtert.<sup>92</sup> Darauf aufbauend werden im Abschnitt 4.6.3<sup>s. 102</sup> die Eckpunkte zur Umsetzung des ökonomischen Bewertungsschemas erarbeitet.

### 4.6.1 Problemstruktur aus Sicht der Investitionsrechnung

Bevor die Erörterung eines geeigneten Bewertungsverfahrens erfolgt, wird die Modernisierungsentscheidung zunächst aus dem Blickwinkel der Investitionsrechnung näher charakterisiert. In diesem Zusammenhang ist zu überlegen, was als einzelne Investition (auch Investitionsprojekt oder -objekt) zu interpretieren ist. Damit verbunden ist die Frage, inwiefern eine separate oder aggregierte Bewertung einzelner Modernisierungsmaßnahmen erfolgen kann bzw. muss.

Zunächst ist festzustellen, dass einzelne Systemgestaltungsoptionen sich gegenseitig ausschließen, nicht ausschließen oder sogar bedingen können. Im Hinblick auf die resultierenden Ein- und Auszahlungen können ihnen keine separaten bzw. unabhängigen Zahlungsfolgen zugeordnet werden. Für den Eigennutzer ist dies dadurch gegeben, dass sämtliche Maßnahmen die bewertungsrelevanten Energienutzungskosten beeinflussen und dabei Wechselwirkungen unterliegen. Für den Vermieter sind zwar die Modernisierungsumlagen eindeutig den einzelnen Maßnahmen zuordenbar, allerdings bestehen gegenseitige Abhängigkeiten bspw. hinsichtlich der erreichbaren

---

<sup>92</sup> Für eine umfassende Darstellung der einzelnen Verfahren sei auf die einschlägige Fachliteratur verwiesen (bspw. [39/117/120/172/235]). Da die statischen Verfahren in der modernen Investitionsrechnung praktisch keine Rolle mehr spielen, sind sie von der folgenden Betrachtung ausgeschlossen. Ebenso unberücksichtigt bleiben die dynamischen Verfahren zur Amortisationsrechnung, den internen Zinssätzen und den Sollzinssätzen. Zwar erfreuen sich diese Methoden in der Praxis einer recht hohen Beliebtheit [216<sup>s. 109</sup>], dennoch sind sie aufgrund ihrer methodischen Schwächen und der damit verbundenen mangelnden Aussagekraft für das zu entwickelnde Bewertungsschema von vornherein abzulehnen (vgl. u. a. [117<sup>s. 106, 110/172<sup>s. 29, 92</sup></sup>]).

Vergleichsmietniveaus und den damit verbundenen Mietsteigerungsmöglichkeiten. Hierdurch wird deutlich, dass eine separate Bewertung einzelner Modernisierungsmaßnahmen nicht zielführend sein kann.<sup>93</sup>

Weiterhin ist zu beachten, dass die einzelnen Systemgestaltungsoptionen unterschiedliche Nutzungszeiträume aufweisen können. Einerseits handelt es sich um Anlagen und Bauteile, die nach ihrer Nutzungsdauer definitiv ersetzt werden müssen, wie bspw. ein Hauptwärmeerzeuger oder ein Fenster. Andererseits existieren Systemoptionen, deren Wegfall die Gebäudenutzbarkeit nicht beeinflussen würde, wie bspw. eine Aufdach-PV-Anlage oder die Außenwanddämmung. Beinhaltet der Planungszeitraum mehrere Umsetzungszeitpunkte und ist die Durchführung einer Maßnahme zu einem bestimmten Zeitpunkt nicht zwingend vorgesehen, sind zusätzlich die Entscheidungen zum Investitionszeitpunkt und zur (Rest-)Nutzungsdauer bzw. dem Ersatzzeitpunkt für einzelne Anlagen und Bauteile für die ökonomische Beurteilung relevant.

Jede Einzelmaßnahme könnte als ein separates Investitionsprojekt gesehen werden. Mit diesem Blickwinkel wäre die Gebäudemodernisierung als Investitionsprogrammentscheidung zu interpretieren, da sich die einzelnen Projekte gegenseitig nicht vollständig ausschließen [172<sup>S.204</sup>]. Werden mindestens zwei mögliche Umsetzungszeitpunkte betrachtet, handelt es sich um eine mehrstufige Programmentscheidung [117<sup>S.47</sup>]. Ein Investitionsprogramm beinhaltet für jeden Umsetzungszeitpunkt des Planungszeitraums ein zulässiges Maßnahmenbündel, wobei auch die Unterlassung der Systemänderung berücksichtigt ist. Die Erfassung der monetären Konsequenzen muss aggregiert auf der Programmebene erfolgen, für die eindeutige Zahlungsfolgen ermittelbar sind. Für das „leere“ Investitionsprogramm, d. h. die Unterlassung jeglicher Systemänderungen im gesamten Planungszeitraum, existiert ebenfalls eine eindeutige Zahlungsfolge.

Alternativ könnte auch jedes Investitionsprogramm selbst als einzelnes Investitionsprojekt gesehen werden. In diesem Fall schließen sich die Investitionsprojekte untereinander vollkommen aus, da bei einer Kombination mindestens eine Systemgestaltungsoption gleichzeitig mehrere Ausprägungen annehmen würde. Die Bestimmung der vorteilhaftesten Handlungsweise wäre mit dieser Sichtweise eine Einzelentscheidung, welche auf der Vorteilhaftigkeitsbeurteilung der Alternativen beruht. Ob es sich

---

<sup>93</sup> Eine Zahlungsfolgenunabhängigkeit ließe sich gegebenenfalls zwischen der Wärme- und Elektroenergieversorgung im Zusammenhang mit dem Betrieb einer PV-Anlage konstruieren. Da im Rahmen dieser Arbeit aber nur Akteure als Anlagebetreiber betrachtet werden, die gleichzeitig in der Rolle eines Gebäude(teil)eigentümers auftreten, wird auch diese Trennung spätestens beim Einbezug der elektrischen Antriebs- und Hilfsenergien für die Wärmeversorgung oder bei der Konkurrenz einer PV-Anlage mit einer solarthermischen Anlage um die verfügbare Dachfläche haltlos.

bei der betrachteten Entscheidungssituation nun um eine Einzel- oder um eine Programmentscheidung handelt, ist somit abhängig vom eingenommenen Blickwinkel und definitorischer Natur. Da für das zu entwickelnde Entscheidungsmodell keine exogene Vorgabe von Investitionsprogrammen vorgesehen ist, sondern die Maßnahmenkombination und die Ermittlung der daraus resultierenden Zahlungsfolgen Teil der Problemlösung sind, entspricht die zu formulierende Problemstruktur eher einer Programmentscheidung (auch Programmplanung).

In der Literatur werden zahlreiche Modellentwicklungen zur Bewertung von Investitionsprogrammen – vorrangig für Unternehmen des Produktionsbereichs – vorgestellt. Erste einfachere Modelle beruhen auf der Erstellung von Ranglisten zur Auswahl einzelner Investitions- und gegebenenfalls unterschiedlicher Finanzierungsmöglichkeiten.<sup>94</sup> Komplexere Modelle – teilweise mit stärkerem Fokus auf einer simultanen Betrachtung der Produktionsplanung und gegebenenfalls mit Berücksichtigung von Steuern – nutzen dagegen die Methoden des Operations Research.<sup>95</sup> Die Überlegungen der folgenden beiden Abschnitte zur Wahl des Investitionsrechenverfahrens und zur Umsetzung des Bewertungsschemas stützen sich u. a. auf Arbeiten aus diesem Schrifttum.

#### 4.6.2 Diskussion und Auswahl des Investitionsrechenverfahrens

Wie bei nahezu jeder Investitionsentscheidung besteht auch bei der Modernisierungsplanung die Problematik, dass sich die einzelnen Investitionsprogramme hinsichtlich der Höhe und dem Zeitpunkt der erforderlichen Anfangsauszahlungen sowie der zeitlichen Struktur der Zahlungsströme unterscheiden, welche sie bedingen. Um eine sinnvolle Vergleichbarkeit zu gewährleisten, sind die einzelnen Handlungsmöglichkeiten durch den Einbezug von Ergänzungsfinanzierungen und Ergänzungsinvestitionen in sogenannte „echte“ Alternativen zu überführen [172 S. 34 ff.]. Vor allem die dabei unterstellten Rahmenbedingungen, mit denen sich der Investor bei der Anlage oder Aufnahme von liquiden Mitteln am Kapitalmarkt konfrontiert sieht, sind ausschlaggebend für die Eignung der zur Verfügung stehenden Investitionsrechenverfahren.

Für den Einsatz der Kapitalwertmethode oder der Annuitätenmethode als etablierte klassische Investitionsrechenverfahren sind bekanntlich starke Vereinfachungen der Rahmenbedingungen zu akzeptieren. Diese beruhen auf der Annahme, dass alle

---

<sup>94</sup> Als Rangordnungskriterium wird bspw. der Kapitalwert (LUTZ & LUTZ [183]) oder der interne Zinsfuß (DEAN [71]) der Handlungsoptionen verwendet.

<sup>95</sup> Impulsgebend waren u. a. die Publikationen von ALBACH [7], CHARNES ET AL. [62], HAX [136], JACOB [151], MASSÉ & GIBRAT [191], SWOBODA [253] und WEINGARTNER [276]. Umfassendere und auch wesentlich komplexere Modellansätze werden bspw. von BLUMENTRATH [40], GRUNDMANN [122], HABERSTOCK [129], HAEGERT [130], MEYHAK [197], ROSENBERG [225], SCHWEIM [239] und WALDMANN [272] vorgestellt.

relevanten Informationen verfügbar sind und damit uneingeschränkte Sicherheit für die zukünftigen Erwartungen herrscht. Dem Investor bietet sich deshalb lediglich eine Möglichkeit zur ergänzenden Kapitalaufnahme bzw. -anlage mit identischem Zinssatz (Kalkulationszinsfuß) für beide Vorgänge [172<sup>s.82</sup>]. Hinsichtlich des Volumens der Inanspruchnahme liegen keine Beschränkungen vor. Die Unterstellung eines solchen vollkommenen, unbeschränkten Kapitalmarktes bringt viele Vorteile mit sich. Einerseits sind unter diesen Bedingungen Vermögensmaximierung und Einkommensmaximierung komplementäre Ziele und müssen nicht differenziert betrachtet werden [172<sup>s.72</sup>]. Andererseits ist es möglich, eine Investitionsentscheidung völlig unabhängig von den Konsumpräferenzen zu treffen [235<sup>s.111</sup>]. Eine Überlegung zur Wahl der Finanzierungsform bezüglich des Einsatzes von Eigen- und Fremdmitteln ist nicht erforderlich. Darüber hinaus ist die Betrachtung der Liquidität hinfällig, da der Investor sich unbegrenzt verschulden kann. Auf dieser Vereinfachung der realen Rahmenbedingungen beruhen alle im Unterkapitel 4.2<sup>s.67</sup> vorgestellten Optimierungsansätze, welche zur Entscheidungsfindung ein Investitionsrechenverfahren nutzen. Auch der *PERSEUS*-Analyseansatz stützt sich auf diese Abstraktion.

Mit den gestellten Anforderungen an das zu entwickelnde Modell ist der Einsatz der klassischen Verfahren für das Bewertungsschema allerdings kritisch zu hinterfragen – selbst dann, wenn die zu erwartenden Konsequenzen der einzelnen Alternativen als sicher erachtet werden könnten. Durch den staatlichen Markteingriff in Form von geförderten Darlehen mit unterschiedlichen Zinskonditionen sind Rahmenbedingungen für den Gebäudeeigentümer vorhanden, die sich eben nicht mit den Annahmen zum vollkommenen Kapitalmarkt vereinen lassen. Insbesondere die unterstellte Egalität der Finanzierungsstruktur bei den klassischen Verfahren ist vor diesem Hintergrund problematisch [113<sup>s.59</sup>]. Ferner dürfte sich der Gebäudeeigentümer kaum in der Lage befinden, Kapitalanlagen mit denselben Verzinsungsansprüchen zu platzieren, zu denen er Fremdmittel aufnehmen kann. Ein Grund hierfür ist mindestens in den Transaktionskosten zu sehen, welche durch die Vermittlung entstehen [140<sup>s.132</sup>]. Wird der Unsicherheitsaspekt hinzugezogen, sieht sich ein Gebäudeeigentümer auch nicht mehr mit der Möglichkeit konfrontiert, unbeschränkt auf Fremdkapital zugreifen zu können. Die Sicherstellung der Liquidität ist deshalb eine wichtige Nebenbedingung bei der Bewertung seiner Handlungsalternativen.

Eine Maßnahme zur realitätsnäheren Abbildung der Entscheidungssituation im Rahmen der klassischen Methoden wäre die Anwendung eines Mischzinssatzes als Kalkulationszinsfuß, der zunächst das Verhältnis von Fremd- und Eigenkapitaleinsatz mit differenzierter Verzinsung berücksichtigen kann.<sup>96</sup> Durch diese Modifikationen

---

<sup>96</sup> Auf diese Vorgehensweise verweisen bspw. *DISCHER* [80<sup>s.40</sup>] und *STOLTE* [250<sup>s.40</sup>].

würden zwar einige der Analyseanforderungen erfüllt, allerdings bleiben andere kritisch zu bewertende Effekte bestehen. Die Ursache ist darin zu sehen, dass der Kalkulationszinsfuß sämtliche, sich durch die differenzierte Betrachtung ergebenden Zinssätze in einer Zahl konzentriert [120<sup>S.84</sup>]. Zwar wird die erwartete Mindestrendite der Investition in Abhängigkeit der gewählten Anfangsfinanzierungsstruktur erfasst, allerdings wird dieser Zinssatz methodenbedingt auch für spätere Ergänzungsfinanzierungen und -investitionen unterstellt. Für letztere bleibt die Annahme bestehen, dass der Investor lediglich eine Möglichkeit Kapitalaufnahme bzw. -anlage hat. Beide Vorgänge weisen nach wie vor denselben Zinssatz auf, welcher nun die anfängliche Finanzierungsstruktur der Investition widerspiegelt. Davon abgesehen ergäbe sich aus dieser Vorgehensweise ein nichtlinearer Zusammenhang, da der Kalkulationszinsfuß aufgrund seiner Abhängigkeit zur Finanzierungsentscheidung endogen zu bestimmen wäre.

Eine andere Möglichkeit zur realitätsnäheren Erfassung des Finanzierungsaspektes bietet sich durch den Ansatz verschiedener Zinssätze für die Ergänzungsfinanzierung und -investition im Rahmen der Vermögensendwertmethode [117<sup>S.92</sup>].<sup>97</sup> Allerdings bleibt auch bei dieser Vorgehensweise eine weitere Problematik bestehen, welche die differenzierte Erfassung der Kapitalbindungsdauern betrifft. Der langfristig ausgerichteten Modernisierungsinvestition wird eine nach wie vor kurzfristige Kapitalanlage gleichberechtigt gegenübergestellt. Investitionen mit langfristigen Zahlungsfolgen unterliegen aber tendenziell einer höheren Unsicherheit, als Investitionen mit kurzfristiger Laufzeit. Hieraus sollten laufzeitabhängige Verzinsungsansprüche resultieren [172<sup>S.83</sup>].<sup>98</sup> Eine weitere Schwäche der Vermögensendwertmethode ist darin zu sehen, dass sie nur einen Zinssatz für die Inanspruchnahme von Fremdkapital zulässt [117<sup>S.115</sup>].

---

<sup>97</sup> Mit dem Ansatz unterschiedlicher Verzinsungssätze für die Ergänzungsfinanzierung und die Ergänzungsinvestition (d. h. Auflösung der Annahme eines vollkommenen Kapitalmarkts mit zulässigem einheitlichen Kalkulationszinsfuß) wird auch der Übergang von der für die klassischen Verfahren typischen Barwertermittlung (Diskontierung) zur Endwertermittlung (Askontierung) notwendig [218<sup>S.368</sup>]. Im Gegensatz zu den klassischen Verfahren werden die einzelnen positiven oder negativen Periodenüberschüsse nicht mehr separat, sondern als fortschreitend kumulierter Bestand an liquiden Mitteln verzinst. Gleichzeitig wird damit eine Voraussetzung zur Berücksichtigung von Sachinvestitionen geschaffen, welche mit einem positiven Mittelbestand in einer Periode alternativ zur Anlage am Kapitalmarkt getätigt werden könnten [151<sup>S.61</sup>].

<sup>98</sup> Auch GÖBELT [116] verweist auf diesen Umstand und versucht in seinem Modell den unterschiedlichen Kapitalbindungsdauern gerecht zu werden, indem er mithilfe eines Wichtungsfaktors die Einflussstärke der Systemgestaltungsausgaben gegenüber den laufenden Einnahmen und Ausgaben des Systembetriebs in der Zielfunktion variiert. Im Prinzip fingiert er damit einen gespaltenen Zinsfuß hinsichtlich der Kapitalbindungsdauer, die er aufgrund des von ihm gewählten Kapitalwertverfahrens nicht explizit berücksichtigen kann.

Die angesprochenen Probleme machen deutlich, dass das klassische Kapitalwertverfahren bzw. das Annuitätenverfahren aufgrund der Annahme vollkommener unbeschränkter Kapitalmärkte für das zu entwickelnde Analyseinstrument ungeeignet sind. Auch die Verwendung von Mischzinssätzen würde zu keinem befriedigenden Ergebnis führen. Die Vermögensendwertmethode erscheint vom Grundansatz her zwar geeignet, allerdings wird sie durch ihre Beschränkung auf lediglich zwei verschiedene Zinssätze den Anforderungen für das zu entwickelnde Modell – insbesondere zur Berücksichtigung der Konditionenvielfalt staatlich geförderter Modernisierungsdarlehen – nicht weitreichend genug gerecht. Die ökonomische Bewertung der Modernisierungsmaßnahmen muss deshalb zu einer vollständigen Finanzplanung ausgeweitet werden. Dieses Verfahren nutzen bei den vorgestellten Arbeiten zur Maßnahmenbewertung *KIEßLING* [163] und *PFNÜR ET AL.* [217]. Von Vertretern der Immobilienwirtschaft wird diese Methode zur Beurteilung von Modernisierungen ebenfalls präferiert [113<sup>S.67</sup>]. Auch die im vorangegangenen Abschnitt angesprochenen umfassenderen Programmplanungsmodelle für Unternehmen stützen sich vorrangig auf dieses Bewertungsinstrument.

Die Grundzüge der vollständigen Finanzplanung werden bereits 1962 von *Heister* [139] konzeptionell erarbeitet. Die Methode unterscheidet sich von den klassischen Verfahren hauptsächlich dadurch, dass nicht nur die originären, sondern auch die derivativen Zahlungsströme detailliert erfasst werden [120<sup>S.104ff.</sup>]. Auf die implizite Betrachtung der ergänzenden Kapitalanlage und -aufnahme in Form eines einheitlichen Kalkulationszinsfußes wird somit verzichtet [119<sup>S.2,6</sup>]. Im Gegensatz zur Vermögensendwertmethode erlaubt die vollständige Finanzplanung den Einbezug vieler separat definierbarer Investitions- und Finanzierungsmöglichkeiten mit spezifischen Zinssätzen. Gleichzeitig ist sie im Rahmen einer linearen Problemformulierung implementierbar [136<sup>S.446</sup>]. Die Eckpunkte zu ihrer Umsetzung im Modell werden im nächsten Abschnitt erarbeitet.

### 4.6.3 Eckpunkte zur Umsetzung der vollständigen Finanzplanung

Verlässt man die idealisierte Welt des vollkommenen, unbeschränkten Kapitalmarktes und erwägt, die realen Rahmenbedingungen eines Investors in ein Bewertungsschema zu integrieren, stößt man schnell an die Grenze der Problemhandhabbarkeit. Die erste Schwierigkeit ergibt sich aus der Tatsache, dass das Separationstheorem von *FISHER* [104] seine Gültigkeit verliert [141]. Dementsprechend wäre die Entscheidung zur Modernisierungsinvestition von den Konsumpräferenzen des Eigentümers abhängig zu machen [235<sup>S.180</sup>]. In praxi dürfte es einem Gebäudeeigentümer allerdings schwer fallen, exakte Substitutionsraten für eine zeitliche Konsumverlagerung anzugeben [172<sup>S.12</sup>]. Für die Modellentwicklung soll deshalb davon ausgegangen werden, dass

der Eigentümer zumindest eine grobe Aussage treffen kann, wann und in welcher Höhe liquide Mittel im Rahmen der betrachteten Entscheidungssituation zum Konsum bereitstehen sollen.<sup>99</sup> Dieser ersten vereinfachenden Modellprämisse wurde im Unterkapitel 4.4<sup>S. 81</sup> durch die Definition der Gewinnzielgrößen „Einkommen“ und „Vermögen“ bereits vorweggegriffen.

In der Regel wird es sich bei der betrachteten Immobilie nur um einen Vermögensausschnitt des Eigentümers handeln, d. h. er verfügt gegebenenfalls über liquide Mittel zum aktuellen Planungszeitpunkt, weitere Vermögensgegenstände und über (zusätzliche)<sup>100</sup> Einnahmequellen. Hinsichtlich einer konsequenten Gewinnmaximierung für den Investor müssten im Prinzip sein gesamtes Vermögen und alle seine Handlungsmöglichkeiten in die Analyse einbezogen werden. Eine derartige Totalplanung ist allerdings weder umsetzbar noch aus Sicht der Aufgabenstellung in dieser Arbeit sinnvoll [164<sup>S. 40</sup>]. Die Modernisierungsentscheidung soll deshalb mithilfe eines Partialmodells betrachtet werden, woraus sich die Notwendigkeit zur Vereinbarung weiterer Prämissen ergibt [129<sup>S. 27</sup>]. Diese beruhen jedoch nicht auf der Idealisierung der Rahmenbedingungen, wie bei den klassischen Bewertungsverfahren, sondern werden durch die Abgrenzung bzw. Beschränkung des realen ökonomischen Handlungsspielraums erreicht (im Folgenden als „Bewertungsrahmen“ bezeichnet), der mit dem Bewertungsschema erfasst werden soll.

#### 4.6.3.1 Finanzielle Abgrenzung des Bewertungsrahmens

Die zweite Modellprämisse betrifft zunächst die Handlungsoptionen bezüglich des Gebäudes. Neben einer Modernisierung könnte der Eigentümer auch den Verkauf der Immobilie erwägen, um den Erlös für Konsum, alternative Sachinvestitionen oder Kapitalanlagen zu verwenden, welche in einem nahezu unbeschränkten Umfang vorhanden sind. Als Bedingung zur Modellanwendung wird gefordert, dass der Verkauf des Gebäudes – zumindest innerhalb des Analysezeitraums – nicht geplant ist.

Die dritte Prämisse definiert die Abgrenzung der finanziellen Sphäre des Gebäudeeigentümers als Investor, welche in die Beurteilung einbezogen wird. Das liquide Eigenmittelbudget, das zu Beginn des Analysezeitraums für die Modernisierungsplanung verfügbar sein soll, wird als Festlegung des Eigentümers gesehen, die er vorab zu treffen hat. Es handelt sich dabei nicht um den Betrag, der auch definitiv in

---

<sup>99</sup> In der Literatur vorgestellte Programmplanungsmodelle für Unternehmen stützen sich auf eine analoge Prämisse. Vgl. bspw. [40<sup>S. 57</sup>/129<sup>S. 31</sup>/136<sup>S. 436</sup>].

<sup>100</sup> Dass im Vermietungsfall das betrachtete Gebäude die einzige Einnahmequelle des Eigentümers darstellt, wäre ein Spezialfall, der aber unter Umständen für ein größeres Mehrfamilienhaus mit hohem Mietpreinsniveau gegeben sein könnte.

Modernisierungsmaßnahmen zu investieren ist, sondern lediglich um Mittel, die er zum Planungszeitpunkt nicht für sofortigen Konsum oder Investitionen außerhalb der betrachteten Entscheidungssituation vorgesehen hat. Dies können bspw. gebildete Rücklagen für Instandsetzungs- bzw. Modernisierungsmaßnahmen sein.

Darüber hinaus beinhaltet der Bewertungsrahmen die mit dem analysierten Gebäude in Zusammenhang stehenden Zahlungen. Neben den Anfangsauszahlungen für die möglichen Modernisierungsmaßnahmen umfassen diese für den Vermieter die Miet-einzahlungen und die Auszahlungen zur Gebäudebewirtschaftung. Für den Eigen-nutzer sind dagegen die regelmäßigen Auszahlungen für seine Energienutzung maß-gebend. Im Fall eines Stromanlagenbetreibers ergänzen die Ein- und Auszahlungen der Anlagenbewirtschaftung die betrachteten Zahlungsfolgen. Weiteren Einfluss haben die Kapitaldienste bei der Inanspruchnahme von Krediten zur Maßnahmen-finanzierung und – in Abhängigkeit der Eigentümerrolle – auch die Auswirkungen der Investitionen auf seine Steuerlast.

Zur Komplexitätsreduktion wird es für die vorliegende Entscheidungssituation als vertretbar erachtet, auf die unterjährige Aufschlüsselung der Zahlungsfolgen zu verzichten. Sämtliche Zahlungsvorgänge sollen vereinfacht betrachtet am Beginn bzw. am Ende eines Modelljahres anfallen. Hinsichtlich des Erfassungsumfangs der Zah-lungen ist vom verbreiteten Mehrertragsansatz (siehe Abschnitt 4.2.1 S. 68) Abstand zu nehmen. Der Grund ist darin zu sehen, dass beim Alternativenvergleich ohne Unter-stellung eines vollkommenen Kapitalmarktes mithilfe endwertbasierter Verfahren wie der vollständigen Finanzplanung, die Vorteilhaftigkeitsbeurteilung nicht mehr zuver-lässig auf die Betrachtung von Differenzinvestitionen gestützt werden kann [39 S. 77].

Ergänzend zum Eigenmittelbudget am Beginn des Analysezeitraums soll auch der zusätzliche Eintrag von liquiden Eigenmitteln zu späteren Zeitpunkten möglich sein. Diese Vorgehensweise dient vor allem der sinnvollen Abbildung der Selbstnutzer-entscheidung. Für diesen Anwendungsfall weist die Zahlungsfolge nur Auszahlungen auf, welche der Selbstnutzer in der Regel aus jährlichen Einnahmen bestreitet, deren Quellen und Volumen nicht erfasst werden. Die Eigenmittel, welche der Selbstnutzer im Unterlassungsfall (keine Maßnahmenumsetzung) zur Energieversorgung im Analy-sezeitraum regelmäßig einsetzen müsste, sollen als jährlicher Eigenmitteleintrag in das Bewertungsschema eingehen.<sup>101</sup>

Die vierte Modellprämisse berührt die Verwendung der liquiden Mittel innerhalb des Bewertungsrahmens sowie den Zugang zu Fremdmitteln. Als Sachinvestitionsmög-lichkeiten werden nur Instandsetzungs- bzw. Modernisierungsmaßnahmen für das

---

<sup>101</sup> Auf eine entsprechende Vorgehensweise stützen auch PFNÜR ET AL. [217 S. 11] ihre Analysen.

Gebäude betrachtet. Um diese zu „echten“ Alternativen zu vervollständigen und damit ihre Vergleichbarkeit zu gewährleisten, ist mindestens eine Ergänzungsinvestition vorzusehen [225<sup>s.57</sup>]. Hierfür wird eine kurzfristige Möglichkeit zur Kapitalanlage (bspw. ein Tagesgeldkonto) definiert. Würde eine Maßnahmeninvestition gerade dieselbe Rendite der kurzfristigen Kapitalanlage erreichen, wäre der Investor indifferent hinsichtlich des Einsatzes seiner Eigenmittel. Da die Maßnahmenumsetzung aber mit einer längerfristigen Kapitalbindung einhergeht ist es nachvollziehbar, dass er hierfür auch einen höheren Verzinsungsanspruch geltend macht, als er mit einer kurzfristigen Kapitalanlage erreichen kann. Aus diesem Grund sollen am Beginn eines jeden Modelljahres die verfügbaren Eigenmittel alternativ auch in einer langfristigen Kapitalanlage mit höherer Verzinsung gebunden werden können.

Auf Seiten der Ergänzungsfinanzierung wird ebenfalls eine kurzfristige Handlungsmöglichkeit in Form einer Kreditaufnahme mit einjähriger Laufzeit vorgesehen [225<sup>s.55 f.</sup>]. Es sollte sich jedoch nicht – wie vereinzelt vorgeschlagen (bspw. [120<sup>s.188</sup>]) – um einen Dispo- bzw. Kontokorrentkredit handeln. Zwar dienen derartige Kredite regelmäßig zur Überbrückung kurzfristiger Liquiditätsengpässe, allerdings für solche, die sich aus ungeplanten Vorkommnissen ergeben. In einer langfristigen Finanzierungsplanung sollte diese Reserve aber nicht von vornherein ausgeschöpft werden [122<sup>s.38</sup>]. Ein weiteres Gegenargument betrifft die anzusetzende Verzinsung, welche für Kontokorrent- bzw. Dispokredite aufgrund ihrer pauschalen Verfügbarkeit verhältnismäßig hoch ist. Im Rahmen einer langfristigen Planung besteht für den Investor aber die Möglichkeit, vorab günstigere Konditionen für einen solchen Überbrückungskredit zu vereinbaren. Letztendlich muss es sich aufgrund des partiellen Charakters des Entscheidungsmodells auch nicht zwingend um Fremdkapital handeln. Zur kurzfristigen Ergänzungsfinanzierung könnte der Gebäudeeigentümer durchaus in der Lage und bereit sein, zusätzliche, nicht von vornherein eingeplante Eigenmittel zeitlich beschränkt in den Bewertungsrahmen einzubringen, sofern entsprechende Verzinsungsansprüche erfüllt werden. Zur langfristigen Ergänzungsfinanzierung sind die Zugriffsmöglichkeiten auf verschiedene Varianten von KfW-Krediten für den Gebäudeeigentümer vorgesehen. Diese sind aufgrund ihrer Zweckgebundenheit ausschließlich in den Umsetzungszeitpunkten zur Finanzierung der Maßnahmenanfangsauszahlungen verfügbar und sollen nicht zur zwischenzeitlichen kurzfristigen Ergänzungsfinanzierung herangezogen werden können.

#### 4.6.3.2 Zeitliche Struktur und Abgrenzung des Bewertungsrahmens

Die fünfte und letzte Prämisse adressiert die zeitliche Strukturierung und Abgrenzung des Bewertungsrahmens sowie die damit im Zusammenhang stehende zeitpunktbezogene Wertermittlung einzelner Handlungsoptionen. Für die Analyse der betrach-

teten Entscheidungssituation ist ein endlicher Planungszeitraum anzusetzen, mit mindestens einem Umsetzungszeitpunkt für Modernisierungsmaßnahmen.<sup>102</sup> Die Vorgabe weiterer Umsetzungszeitpunkte im Planungszeitraum kann zur Abbildung von (vorrangig bestehenden) Systemkomponenten erforderlich sein, deren Nutzungsdauer vor dem Erreichen des Planungshorizontes endet. Gleichzeitig kann aber auch die gegebenenfalls vorteilhafte vorzeitige Erneuerung bzw. Deinstallation einzelner Anlagen und Bauteile durch die Definition zusätzlicher Umsetzungszeitpunkte ohne Handlungs-zwang in die Analyse einbezogen werden.

Hinsichtlich der Festlegung der Planungszeiträume wäre es wünschenswert, die ökonomischen Konsequenzen der Modernisierungsmaßnahmen über deren gesamte Nutzungsdauer zu erfassen. Diese Vorgehensweise gestaltet sich für die betrachtete Entscheidungssituation vor allem aus zwei Gründen problematisch. Zum einen können einzelne Systemkomponenten sehr lange Standardnutzungsdauern (bspw. die Außenwanddämmung ca. 40 Jahre [11]) aufweisen. Für derart weitreichende Zeiträume unterliegen die erforderlichen Annahmen zur Entwicklung der relevanten Rahmendaten einer sehr hohen Unsicherheit. Zum anderen ist aufgrund der unterschiedlichen Nutzungsdauern sowie dem erforderlichem Ersatz einzelner Anlagen und Bauteile in der Regel erst durch den Rückbau des Gebäudes am Ende seines Lebenszyklus ein einheitliches Nutzungsende für alle seine Komponenten gegeben. Dieser Zeitpunkt kann unter Umständen noch wesentlich weiter in der Zukunft liegen, als die längste Nutzungsdauer einer betrachteten Systemgestaltungsoption.

Eine geeignete Handhabung dieser Problematik wird erkennbar, wenn die Gebäudemodernisierung als rollierende Planungsaufgabe verstanden wird. Das bedeutet, dass lediglich die unmittelbar anstehenden Entscheidungen des ersten Umsetzungszeitpunkts einen endgültigen Charakter und damit die höchste Relevanz aufweisen [130<sup>S. 14</sup>]. Mit dieser Perspektive kann weitgehend unabhängig von der Anzahl der definierten Umsetzungszeitpunkte und den verschiedenen Nutzungsdauern der Systemkomponenten ein Planungszeitraum gewählt werden, der zumindest einen genügend weitreichenden Betrachtungshorizont zur sinnvollen Bewertung der langfristig wirkenden Handlungsoptionen des ersten Umsetzungszeitpunktes aufweist [151<sup>S. 553</sup>]. Gleichzeitig wird eine Beschränkung der Planungszeiträume möglich, mit der die Prognosefehler der exogenen Einflussgrößen in einem überschaubaren

---

<sup>102</sup> Die Notwendigkeit zur Beschränkung der Planungszeiträume ergibt sich einerseits aus der mangelnden vollkommenen Voraussicht des Entscheidungsträgers und andererseits aus Gründen der Problemhandbarkeit [129<sup>S. 28</sup>]. Das Ende des Planungs- bzw. Analysezeitraums wird im Folgenden als Planungs- bzw. Analysehorizont bezeichnet.

Rahmen gehalten werden können.<sup>103</sup> In der Immobilienwirtschaft wird hierfür ein Planungszeitraum von 20 Jahren empfohlen [113 S. 70/163 S. 135], der im Rahmen dieser Arbeit auch für den Eigennutzerfall als geeignet erachtet wird.

Aufgrund der bestehenden Wechselwirkungen sind bei der Analyse der Handlungsoptionen des ersten Umsetzungszeitpunktes die technischen und ökonomischen Modellentscheidungen der späteren Jahre zu antizipieren. Letztere sind aber zunächst nur von vorläufiger Natur. Rückt ein im Modell abgebildeter Zeitpunkt in der Realität heran, werden die vorläufigen Festlegungen für diesen Zeitpunkt anhand der dann zur Verfügung stehenden Informationen mit entsprechend nach hinten verschobenem Planungshorizont überprüft, gegebenenfalls modifiziert und umgesetzt. Dabei sind unter Umständen auch die ursprünglichen Entscheidungen für die nachfolgenden Zeitpunkte anzupassen, welche erneut vorläufig getroffen werden [237 S. 33].

Da die Entscheidungen zur Ausprägung und zum Einsatz der technischen Systemoptionen sowie zur langfristigen Fremdkapitalinanspruchnahme nur für definierte Umsetzungszeitpunkte zu fällen sind, ist ihre Anzahl zur Problemgrößenbeschränkung möglichst klein zu halten. Gleichzeitig sollte sich ihre Vorgabe auf den Anfang des Analysezeitraums konzentrieren, um dem Fokus einer rollierenden Planung auf die direkt anstehenden Entscheidungen gerecht zu werden [197 S. 40]. Alternativ zur endogenen Ersatz- bzw. Rückbauentscheidung am Nutzungsdauerende kann für eine Systemoption zu diesem Zeitpunkt auch eine Reparatur- bzw. Instandsetzungsauszahlung fix vorgegeben werden, durch welche ihre Nutzungsdauer mindestens bis zum Planungshorizont verlängert werden kann. Mit dieser Vorgehensweise ist es möglich, die Anzahl der einbezogenen Umsetzungszeitpunkte im Planungszeitraum zusätzlich zu reduzieren. Sie sollte allerdings vorrangig zur Vermeidung von Umsetzungszeitpunkten nahe dem Planungshorizont genutzt werden, deren Entscheidungen im Moment ohnehin nur sehr vage getroffen werden können und für die die Interdependenzen mit den zeitnah anstehenden Entscheidungen eher schwach ausgeprägt sind.

Aufgrund der zeitlichen Beschränkung des Bewertungsschemas stellt sich die Frage, wie die Maßnahmen, deren Nutzungsdauer über den betrachteten Planungszeitraum hinausreicht, an dessen Ende zu bewerten sind. Eine übliche Vorgehensweise zur monetären Wertbestimmung von Sachinvestitionen mit möglicher Weiternutzung

---

<sup>103</sup> Dieser Aspekt unterliegt natürlich einer subjektiven Beurteilung. So terminiert KRÜMMEL [171 S. 229] den weitreichendsten noch sinnvollen Planungshorizont durch den Zeitpunkt, jenseits dem die Glaubwürdigkeit des Eintritts der Plandaten vom Entscheidungsträger bezweifelt wird. In anderen Arbeiten wird der Planungshorizont als erreicht angesehen, wenn Entscheidungen nach diesem Zeitpunkt keinen wesentlichen Einfluss mehr auf die zeitnah zu treffenden Entscheidungen haben (vgl. u. a. [7 S. 226/27 S. 57/150 S. 51]). In diesem Zusammenhang schlägt BLUMENTRAHT [40 S. 219 ff.] ein recht aufwendiges Verfahren zur Approximation des Planungshorizonts vor, dessen praktischer Mehrwert allerdings hinterfragt werden kann [129 S. 48].

nach dem Bewertungszeitpunkt basiert auf der Betrachtung ihrer (fiktiven) Liquidation [172<sup>S. 41</sup>]. Hierfür wird der Blickwinkel eines potenziellen Käufers eingenommen, der seine Zahlungsbereitschaft anhand der von ihm erwarteten Rückflüsse innerhalb der verbleibenden Restnutzungsdauer mithilfe des Kapitalwertverfahrens bemessen würde. Dementsprechend sind die durch das Investitionsobjekt bedingten Zahlungen jenseits des Analysezeitraums auf den Planungshorizont als Liquidationszeitpunkt abzuzinsen. Für die vorliegende Entscheidungssituation ist dabei zu berücksichtigen, dass viele Versorgungsanlagen und Bauteile für sich allein genommen keinen bzw. keinen nennenswerten Gebrauchtwert aufweisen, sondern ihr Wert sich vorrangig im eingebauten Zustand bzw. im funktionalen Zusammenhang mit dem gesamten Gebäude begründen lässt.<sup>104</sup> Die Restwertbeurteilung müsste deshalb auf einer fiktiven Liquidation des Gebäudes beruhen [113<sup>S. 71</sup>].

Abgesehen davon, dass der Gebäudemodernisierungsgrad zwar eine Auswirkung auf den Liquidationserlös haben sollte [217<sup>S. 19</sup>], diese aber gegebenenfalls stark von anderen Beurteilungskriterien (bspw. Standortfaktoren) überlagert wird, ist diese Vorgehensweise für die geplante Modellentwicklung aus den folgenden zwei Gründen kritisch zu sehen. Zum einen ist die hohe Unsicherheit weit in der Zukunft liegender Rückflüsse zu nennen, deren Barwert im Planungshorizont bei der Maßnahmenbeurteilung aber einen großen Einfluss haben kann.<sup>105</sup> In diesem Zusammenhang ist auch die Schwierigkeit zur Bestimmung eines geeigneten Abzinsungsfaktors anzuführen. Zum anderen wäre es für einen sinnvollen Vorteilhaftigkeitsvergleich mehrerer Maßnahmenoptionen mit divergierenden Restnutzungsdauern am Planungszeitraumende notwendig, die ökonomischen Konsequenzen jenseits davon eindeutig den einzelnen Maßnahmen zuzuordnen. Aufgrund der vorhandenen Wechselwirkungen ist dies jedoch kaum möglich.

Der alternative Weg besteht darin, die Entscheidungsfindung auf die ökonomischen Konsequenzen innerhalb des Planungszeitraums zu stützen ohne die unsicheren Erwartungen für nachfolgende Zeiträume einzubeziehen. Da die Interdependenzen zwischen den einzelnen Handlungsoptionen durch das Bewertungsschema vollständig erfasst werden, ist diesseits des Planungshorizontes eine maßnahmenpezifische Zuordnung von Rückflüssen nicht erforderlich. Bei der Vorteilhaftigkeitsbeurteilung

---

<sup>104</sup> Eine Ausnahme bilden womöglich KWK- und PV-Anlagen. Hier hat sich auch für „betagtere“ Anlagen inzwischen ein Markt entwickelt. Zu berücksichtigen ist aber, dass mit Blick auf die staatlichen Förderrichtlinien die zu erwarteten Rückflüsse im Fall des Weiterbetriebs der eingebauten Bestandsanlage von den Rückflüssen im Fall der Neuinstallation derselben Anlage anderorts, aufgrund der unterschiedlichen Inbetriebnahmezeitpunkte und des Anlagenstatus (neu/gebraucht) voneinander abweichen können.

<sup>105</sup> So zeigt sich bspw. bei der von *KIEßLING* [163] vorgenommenen Maßnahmenbewertung, dass erst in Abhängigkeit des Barwerts der angenommenen Rückflüsse nach dem Ende des Planungszeitraums ein positives Endwert-Delta gegenüber der Unterlassungsalternative erreicht werden kann.

wird der Wertverzehr der einzelnen Systemkomponente bis zum Planungshorizont betrachtet, um der Diskrepanz zwischen beschränktem Analysezeitraum und unterschiedlich lang darüber hinausreichender Nutzungsdauern Rechnung zu tragen [151<sup>s. 553</sup>]. Eine lineare Wertminderung unterstellend, ist der Restwert einer einzelnen Systemgestaltungsoption im Analysehorizont aus der Anfangsauszahlung und dem Verhältnis des verbleibenden Nutzungsdaueranteils außerhalb des Planungshorizontes zur technischen Gesamtnutzungsdauer zu bestimmen. Auch diese Vorgehensweise kann kritisch gesehen werden, da die Gefahr besteht, den realen Wert einer Modernisierungsmaßnahme im Sinne einer marktwertbasierten Vermögensbetrachtung im Planungshorizont gegebenenfalls deutlich zu unterschätzen.<sup>106</sup> Allerdings bietet sie den Vorteil, dass jeder einzelnen Maßnahme ein eindeutiger Restwert zugeordnet werden kann und die Abhängigkeit der Entscheidungsfindung von sehr unsicheren Plandaten zumindest gemildert wird.

Beide Wege zur Wertbestimmung einer Systemkomponente im Analysehorizont sind nicht vollständig befriedigend. Aufgrund der genannten Vorteile und der einfacheren Umsetzung im Rahmen der mathematischen Problemformulierung wird für die Modellentwicklung die Betrachtung des Wertverzehrs bevorzugt. Durch einen zusätzlichen Korrekturfaktor soll der so ermittelte Restwert aber variiert werden können. Somit bleibt es dem Modellanwender überlassen, sich auch der andern Perspektive anzunähern. Gleichzeitig ergibt sich die Möglichkeit, Einfluss auf die geforderte Amortisationsdauer einzelner langfristig nutzbarer Modernisierungen zu nehmen. Wird der Restwert einer Systemgestaltungsoption bspw. auf null gesetzt, würde sie nur gewählt, wenn sie sich bis zum Analysehorizont unter Berücksichtigung von Verzinsungsansprüchen der investierten Mittel vollständig amortisiert.

Mit Blick auf die Beschränkung des Planungszeitraums sind abschließend noch die Festlegungen für die einbezogenen ökonomischen Handlungsoptionen zu formulieren. Diese betreffen lediglich die langfristig wirksamen Entscheidungen, da das Nutzungsdauerende der kurzfristigen Möglichkeiten zur Anlage- und Aufnahme liquider Mittel aufgrund der jeweils angenommen einjährigen Laufzeit immer mit dem Ende des Planungszeitraums zusammenfällt. Für alle langfristigen Ergänzungsinvestitionen wird die Festlegung getroffen, dass diese im Analysehorizont aufgelöst werden. Die Laufzeit dieser Kapitalanlagen ergibt sich damit aus der Zeitspanne zwischen dem Analysehorizont und dem Anfang des Modelljahres, an dem sie vorgenommen werden. Die jeweils anzusetzenden Verzinsungsansprüche spiegeln die verschiedenen Bindungsdauern wider.

---

<sup>106</sup> Unter dem Gesichtspunkt einer Gebäudeliiquidation im Planungshorizont wäre sie gerechtfertigt, falls der potenzielle Käufer seine Preisbereitschaft für die Modernisierungen ausschließlich an den ursprünglichen Herstellungsauszahlungen unter Berücksichtigung der verbleibenden Nutzungsdauer orientiert.

Eine entsprechende Anforderung wird auch für die langfristige Fremdfinanzierung formuliert. Um die Bewertung von Restschulden zum Planungshorizont zu umgehen, sollen alle betrachteten Kreditvarianten bis zu diesem Zeitpunkt vollständig getilgt sein. Mit dieser Vorgabe wird die Vielfalt zur langfristigen KfW-Fremdfinanzierung vor allem für eventuell einbezogene späte Umsetzungspunkte natürlich zunehmend eingeschränkt. Auch hier ist aber zu berücksichtigen, dass im Rahmen der rollierenden Modernisierungsplanung die im Moment zu treffenden vorläufigen Entscheidungen zeitnah vor ihrer Umsetzung mit entsprechend nach hinten verschobenem Planungshorizont und den dann zur Verfügung stehenden Kreditvarianten erneut zu beurteilen sind.

Trotz des Fokus auf die ökonomischen Konsequenzen innerhalb eines beschränkten Planungszeitraums unterliegen die Plandaten mehr oder weniger stark ausgeprägten Unsicherheiten. Ursache hierfür ist ihre Abhängigkeit von Rahmenbedingungen, welche durch den Entscheidungsträger selbst nicht beeinflusst werden können. Dieser Aspekt der Modernisierungsentscheidung und dessen Handhabung im zu entwickelnden Modell werden im nächsten Unterkapitel näher beleuchtet.

## 4.7 Vorüberlegungen zur Berücksichtigung von Unsicherheiten der Modernisierungsplanung

Eine Bewertung von Handlungsalternativen beruht regelmäßig auf Annahmen, da sich die realen Auswirkungen erst nach ihrer Umsetzung zeigen können. Die Entwicklung der Rahmenbedingungen bzw. Umweltlagen, welche einen wesentlichen Einfluss auf die Entscheidungskonsequenzen haben, unterliegt dabei verschiedenen (Un-)Sicherheitsgraden.<sup>107</sup> In der Regel ist die sichere Kenntnis des zukünftigen Zustandes einer Einflussgröße nicht gegeben. Gleiches gilt für die exakte Vorhersage von Eintrittswahrscheinlichkeiten möglicher Zustände. Allerdings können hierfür oftmals relativ verlässliche objektive oder zumindest gute subjektive Prognosen getroffen werden. Natürlich lassen sich auch für schwer vorhersehbare Einflussgrößenzustände Abschätzungen formulieren. Gründen diese jedoch auf vagen Vermutungen oder lässt sich nicht für jeden eine Eintrittswahrscheinlichkeit bestimmen, liegt Ungewissheit vor [20 S. 68]. Eine Entscheidung wird deshalb regelmäßig unter Risiko (Prognose der Eintrittswahrscheinlichkeiten ist möglich), in Abhängigkeit verfügbarer belastbarer Informationen aber auch unter Ungewissheit zu treffen sein.

---

<sup>107</sup> Zur ausführlichen Definition der in diesem Zusammenhang nachfolgend verwendeten Begriffe „Sicherheit/Gewissheit“ sowie „Unsicherheit“ mit den Unterkategorien „Risiko“ und „Ungewissheit“ vgl. bspw. [20 S. 19/83 S. 49/127 S. 141 f.].

Im Allgemeinen kann von einer Risikoaversion des Entscheidungsträgers ausgegangen werden [164<sup>S.117</sup>]. Demnach sollte er an einer möglichst robusten Entscheidung interessiert sein, die mit niedriger Empfindlichkeit gegenüber der unsicheren Einflussgrößenentwicklung bestmöglich zu seinen Zielsetzungen beitragen kann [237<sup>S.90 ff.</sup>]. Das gilt insbesondere dann, wenn einmal umgesetzte (Fehl-)Entscheidungen nur mit beträchtlichem Kapitaleinsatz zu revidieren sind. Für Gebäudemodernisierungen ist dies regelmäßig der Fall. Somit ist zu diskutieren, wie Unsicherheiten im Rahmen der modellgestützten Entscheidungsvorbereitung zur Gebäudemodernisierung Berücksichtigung finden.

Grundsätzlich kann die Modernisierungsentscheidung dem sogenannten „Here and now“-Problemtyp [187] zugeordnet werden, welcher als Optimierungsaufgabe erstmals von *DANTZIG* [70] und zeitnah auch von *BEALE* [26] publiziert wurde. Bei diesem Problemtyp ist eine endgültige Entscheidung zu treffen und umzusetzen, wobei in die Alternativenbewertung später eintretende unsichere Umweltlagen einfließen, gegenüber denen sie sich bewähren muss [237<sup>S.195</sup>]. Allerdings trifft das nicht auf alle Entscheidungen in dem zu entwickelnden Modell gleichermaßen zu. Auf die zeitliche Nähe von Planung/Entscheidung und Umsetzung/Realisation mit der Differenzierung nach endgültig und vorläufig zu treffenden Entscheidungen wurde bereits im Unterabschnitt 4.6.3.2<sup>S.105</sup> näher eingegangen. Ein zweiter Aspekt wurde lediglich angedeutet und soll deshalb an dieser Stelle nochmal deutlicher hervorgehoben werden. Dieser betrifft die Bindungsdauer einer Entscheidung. Hierunter soll der Zeitraum verstanden werden, innerhalb dem die Änderung einer umgesetzten Entscheidung mit erheblichen Auszahlungen verbunden ist bzw. sich aus rechtlicher Sicht ausschließt. Vor diesem Hintergrund zählen zu den langfristig bindenden Entscheidungen die Umsetzung der Modernisierungsmaßnahmen und deren Finanzierung, sowie der Eigenmitteleinsatz für die langfristige Kapitalanlage am Beginn eines Modelljahres jeweils bis zum Analysehorizont. Von kurzfristiger Bindungsdauer sind neben den Kapitalanlagen und Krediten mit einjähriger Laufzeit bspw. auch die Entscheidungen zum Anlageneinsatz oder die Preispolitik des Anlagenbetreibers für die objektinterne Elektroenergieversorgung.

Festzustellen ist, dass die Vorteilhaftigkeit der verschiedenen technischen und ökonomischen Handlungsmöglichkeiten des Gebäudeeigentümers unterschiedlich stark von einzelnen unsicheren Einflussgrößen abhängt. Ferner ist zu berücksichtigen, dass einzelne denkbare Handlungsoptionen nur bei entsprechender Entwicklung der relevanten Rahmenbedingungen realisiert werden können. Für die betrachtete Entscheidungssituation muss deshalb davon ausgegangen werden, dass keine (perfekte) Lösung für die technische Systemgestaltung, den Anlageneinsatz und die Ausprägung der ökonomischen Entscheidungsaspekte existiert, welche für alle

denkbaren Zustandsentwicklungen der unsicheren Einflussgrößen sowohl zulässig als auch optimal ist. Somit ist eine Kompromisslösung zu identifizieren, die möglichst robust und umfassend in der Lage ist, zu den Zielsetzungen des Gebäudeeigentümers beizutragen [237 S. 72 f.].

Einerseits kann eine Planung bzw. Entscheidung als robust angesehen werden, wenn sie sich als stabil erweist. Das bedeutet, dass sie auch bei Abweichungen der prognostizierten Einflussgrößen ohne oder nur mit geringfügigen Anpassungen zulässig umsetzbar ist und gleichzeitig eine hohe positive Zielwirkung erreicht. Unter diesen Bedingungen wäre der ursprüngliche Plan also weitestgehend unabhängig von der Entwicklung der Rahmenbedingungen. Andererseits ist eine Lösung als robust zu bezeichnen, wenn sie mangelnde Stabilität durch ein ausreichendes Maß an Flexibilität ausgleichen kann. Das bedeutet, dass sie Möglichkeiten zur Anpassung beinhaltet, welche die Zielerreichung fördern.<sup>108</sup>

Mit den kurzfristigen und den vorläufigen langfristigen Entscheidungen weist die Modernisierungsplanung bereits ein gewisses Maß an Flexibilität auf, welches nicht nur ungünstigen Umweltlagen entgegenwirken, sondern auch Chancen (bspw. nicht erwartete Mietsteigerungspotenziale) nutzen kann. Möglichkeiten zur Schaffung von zusätzlicher Flexibilität im Rahmen der endgültigen langfristigen Entscheidung bestehen bspw. durch die Kombination sich ergänzender Wärmeerzeuger mit unterschiedlichen Energieträgern. Ebenso beinhaltet die Dimensionierung von Energiespeichern ein gewisses Flexibilitätspotenzial. Die Vorhaltung vollständig redundanter bzw. stark überdimensionierter Versorgungsanlagen stellt in der Regel aber keine sinnvolle Option dar.<sup>109</sup> Auf der Seite der langfristigen Fremdfinanzierung wäre als flexibilitätsfördernd bspw. der Abschluss von Krediten mit Möglichkeit zur Sondertilgung oder kurzen Zinsbindungsdauern einzuschätzen. Letzteres birgt allerdings Gefahren und Chancen gleichermaßen und wäre von einem risikoaversen Investor im Sinne einer robusten Planung eher abzulehnen. Auch das Zurückstellen von Maßnahmen, die im Moment nicht dringend erforderlich sind, kann sich flexibilitätssteigernd auswirken. Insgesamt ist das techno-ökonomische Potenzial zur Schaffung von Flexibilität bei der Modernisierungsplanung jedoch eher als beschränkt einzuschätzen, sodass mit dem Ziel einer robusten Entscheidungsfindung der Identifikation einer stabilen Lösung die größere Bedeutung beizumessen ist.

---

<sup>108</sup> Davon Abzugrenzen ist der im Folgenden verwendete Begriff „Elastizität“. Dieser beschreibt ebenfalls die Anpassungsfähigkeit einer Planung, jedoch ohne Bezug auf die Zielwirkung zu nehmen. Damit werden sämtliche Planfreiheitsgrade adressiert, unabhängig davon, ob sie sich positiv, negativ oder überhaupt nicht auf die Zielerreichung auswirken [237 S. 93 ff.].

<sup>109</sup> Durch diese Vorgehensweise würde sich zwar die Elastizität aber kaum die Flexibilität steigern lassen.

Um eine robuste Modernisierungsentscheidung zu fällen, sind verschiedene mögliche Zustandsentwicklungen der Einflussgrößen in Form von Szenarien in die Analyse einzubeziehen. Zur direkten Berücksichtigung der Szenarien wäre ein stochastisches Optimierungsmodell zu erstellen, welches in seiner Instanz mehrwertige (unsichere) Parameter aufweist und unmittelbar eine robuste Lösung ausgeben kann. Mit der vorgesehenen Modellierungsmethode ist zu erwarten, dass nicht nur die Zielfunktion sondern auch Parameter in den Nebenbedingungen von Unsicherheiten betroffen sind, sodass einzelne Alternativen nur mit bestimmten Wahrscheinlichkeiten zulässig wären. Dabei können in Abhängigkeit des Szenarios Unzulässigkeiten auf der technischen Seite aus der notwendigen Deckung des Energiebedarfs und auf der ökonomischen Seite aus der Liquiditätsanforderung entstehen. Eine Vorgehensweise im Sinne des *Chance-Constrained-Ansatzes* [61/237<sup>s.74</sup>], bei dem Nebenbedingungen nur mit einer bestimmten Wahrscheinlichkeit eingehalten werden müssen, ist deshalb im vorliegenden Fall kaum geeignet. In die zulässige Lösungsmenge würden dann auch Alternativen eingehen, die im Extremfall die Nichtnutzbarkeit des Gebäudes oder die Insolvenz des Eigentümers bedingen könnten und daher allenfalls mit der Sichtweise eines sehr risikoaffinen Gebäudeeigentümers vereinbar sind. Das zu erstellende Modell sollte durch den Einbezug der vorläufigen und kurzfristigen Entscheidungsaspekte allerdings eine ausreichende Elastizität gegenüber denkbaren Szenarien aufweisen. Da die Auswirkungen dieser Ausgleichsmöglichkeiten auf die Zielerreichung erfasst werden können, liegt im Prinzip eine Problemstruktur im Sinne des *Kompensationsansatzes* vor [237<sup>s.74</sup>]. Auf der technischen Seite bestehen entsprechende Ausgleichspotenziale bspw. durch die Anpassung des Anlageneinsatzes. Auf der finanziellen Seite wäre die Aufnahme eines kurzfristigen Kredits oder die Auflösung eines Guthabens als mögliche Kompensationsmaßnahmen zu interpretieren.

Eine umfassende stochastische Analyse erhöht die Problemgröße beträchtlich. Der alternative Weg besteht in der indirekten Berücksichtigung der Unsicherheiten. Hierdurch wird die Modellkomplexität nicht gesteigert, da die mehrwertigen Informationen für eine Modellentscheidung zu einem Ersatzwert verdichtet werden. Die Unsicherheiten bleiben zunächst außen vor und den Einflussgrößen wird durch ihre fixierte Zustandsausprägung Gewissheit unterstellt. Die Analyse erfolgt dann anhand dieses deterministischen Ersatzwertmodells [164<sup>s.52</sup>]. Die Wahl der Ersatzwerte erfolgt entsprechend der Risikopräferenz des Entscheidungsträgers. Differenziert wird zwischen risikoneutral (die Ersatzwerte entsprechen den Erwartungswerten der Einflussgrößen) und risikoavers (als Ersatzwerte werden um Sicherheitszuschläge bzw. -abschläge korrigierten Erwartungswerte vorgegeben). Letztere werden auch als Korrekturwerte bezeichnet.

Naturgemäß ist mit einer derartigen Informationsverdichtung auch ein Informationsverlust verbunden, sodass im Hinblick auf eine robuste Entscheidung zusätzliche Analysen im Nachgang zur eigentlichen Modellentscheidung notwendig sind. Die Robustheit einer gefundenen deterministischen Lösung gegenüber anderen möglichen Umweltlagen kann mittels Parametermodulation im Rahmen einer *Sensitivitätsanalyse* geprüft werden. Hierbei wird der Bereich der Ersatzwertabweichung ausgelotet, indem die Basislösung stabil bleibt [204<sup>s. 119 f.</sup>]. Im vorliegenden Fall beinhaltet die Basislösung lediglich die endgültigen Entscheidungen des ersten Umsetzungszeitpunkts. Die Sensitivitätsanalyse kann für die Variation einzelner Parameter befriedigende Ergebnisse für LP-Modelle liefern und wird teilweise auch von kommerziellen Solvern geleistet. Im vorliegenden Fall eines MILP ist ihre Eignung zum Finden einer robusten Lösung in der Regel stark eingeschränkt.<sup>110</sup> Das Problem besteht darin, dass die beste deterministisch ermittelte Alternative eines Szenarios durchaus sehr instabil gegenüber kleinen Variationen der Eingangsparameter sein kann. Schon eine minimale Änderung der Eingangsgrößen führt dann dazu, dass sich eine völlig andere Basislösung als szenariooptimal zeigt.<sup>111</sup> Eine Möglichkeit zum Umgang mit dieser Problematik könnte darin bestehen, höhere Sicherheitskorrekturen für die Erwartungswerte vorzunehmen, um dadurch gegebenenfalls zu einer stabileren Basislösung zu gelangen. Ebenso denkbar wäre der Versuch, ähnliche Teile der Basislösungen verschiedener Szenarioläufe zu einer Kompromisslösung zu kombinieren. Allerdings ist diese Vorgehensweise hinsichtlich des Auffindens einer möglichst nah am Optimum liegenden Lösung nicht zwingend zielführend.<sup>112</sup>

Ein weiterer Weg zur indirekten Identifikation einer möglichst robusten Lösung bietet sich mit einer nachgelagerten Szenarioanalyse. Hierfür ist die ermittelte Basislösung jedes Szenarios zu fixieren und im Rahmen einer Eingangsdatenmodulation den Parameterzuständen der jeweils anderen Szenarien zu unterwerfen [154<sup>s. 15</sup>]. Treten für ein Szenario Unlösbarkeiten auf, d. h. die bestehenden Kompensationsmöglichkeiten des Gebäudeeigentümers sind nicht ausreichend, ist diese Basislösung zu verwerfen. Aus den so ermittelten (diskreten) Zielfunktionswertverteilungen der zulässigen Basislösungen kann die robusteste Lösung mithilfe von bekannten Entscheidungsregeln und gegebenenfalls unter Beachtung der Risikopräferenz des Gebäudeeigentümers identifiziert werden. Beispielhaft seien an dieser Stelle das  $(\mu, \sigma)$ -Prinzip bei Risiko oder die *Hurwicz-Regel* bei Ungewissheit genannt [20<sup>s. 92, 113</sup>]. Offensichtlich ist aber, dass hieraus ein sehr hoher Modellierungs- und Modellanwendungsaufwand resultiert. Zwar kann sich die Rechenzeit durch die Fixierung der Basislösung verrin-

---

<sup>110</sup> Vgl. [154<sup>s. 13</sup>] und [237<sup>s. 189</sup>] mit Verweis auf [66/271/285].

<sup>111</sup> Dieser Umstand wird als Penny-Switching-Effekt oder auch Bang-Bang-Effekt bezeichnet [256<sup>s. 60</sup>].

<sup>112</sup> Vgl. [237<sup>s. 193</sup>] mit Verweis auf [273].

gern, allerdings ist für jedes Szenario und jede Basislösung ein Modelllauf vorzunehmen. Dementsprechend ist diese Vorgehensweise nur für eine sehr kleine Anzahl von Szenarien geeignet und muss sich somit auf einzelne wenige Ausprägungen unsicherer Parameter mit hoher Einflussstärke beschränken.

Zu resümieren ist, dass dem stochastischen Optimierungsmodell prinzipiell der Vorrang zu geben wäre, da es eine robuste Lösung für die betrachtete Entscheidungssituation unmittelbar bestimmen kann. Allerdings besteht für die vorgesehene Aufgabenstellung die Gefahr, schnell Problemgrößen zu erreichen, die nicht mehr in akzeptablen Rechenzeiten lösbar sind. Aus diesem Grund wird für die Modellentwicklung der alternative Weg zur indirekten Unsicherheitsberücksichtigung beschritten. Obwohl für rollierende Planungsaufgaben wie im vorliegenden Fall, ein deterministischer Modellansatz zur Entscheidungsunterstützung als vertretbar erachtet werden kann [197<sup>s.42</sup>], sind die Möglichkeiten zum Erkennen einer robusten Basislösung für ein breites Spektrum an unsicheren Einflussgrößen stark eingeschränkt. Mit der nachgelagerten Szenarioanalyse besteht zumindest für eine sehr geringe Anzahl an denkbaren Umweltlagen die Option, eine relativ ergebnisstabile und zulässige Lösung für die betrachteten Szenarien zu identifizieren. Der Abstand zur besten stochastischen Lösung lässt sich allerdings nicht unmittelbar beurteilen.

## **4.8 Zusammenfassende methodische Einordnung des zu entwickelnden Modells**

Basierend auf den methodischen Vorüberlegungen und Festlegungen in den vorangegangenen Unterkapiteln kann der zu erstellende Analyseansatz nun in die bestehende Modelllandschaft zur ökonomisch ausgerichteten Entscheidungsunterstützung im Rahmen der energetischen Gebäudeauslegung eingeordnet werden.

Mit der im Folgenden vorgesehen Modellentwicklung wird ein Analyseansatz erarbeitet, welcher simultan die Bildung von Handlungsalternativen und deren ökonomische Vorteilhaftigkeitsbewertung im Rahmen einer Gebäudemodernisierungsplanung leistet und daraus optimale Handlungsempfehlungen für den Eigentümer bestimmen kann. Bestehende Unsicherheiten hinsichtlich der Entwicklung entscheidungsrelevanter Rahmenbedingungen und Einflussgrößen können aus Gründen der Komplexitätsreduktion nur indirekt berücksichtigt werden.

Die bei den existierenden Optimierungsmodellen bislang vernachlässigten Aspekte der Entscheidungssituation werden in der Modellentwicklung aufgegriffen. So wird es möglich sein, neben der Selbstnutzerperspektive auch die Sichtweise eines vermietenden Gebäudeeigentümers einzunehmen und die Handlungsoptionen zur Bewirt-

schaftung von stromerzeugenden Anlagen umfassend zu betrachten. Die ökonomische Beurteilung der Modernisierungsoptionen beruht auf einer vollständigen Finanzplanung. Dieses Verfahren erlaubt, die Finanzierungsseite zur Maßnahmenumsetzung vor dem Hintergrund der differenzierten staatlichen Förderinstrumente und die steuerlichen Aspekte detailliert in die Entscheidungsfindung einzubeziehen.

Die Bildung und Beurteilung zulässiger Handlungsalternativen stützt sich auf ein implizites Restriktionensystem. Das zu entwickelnde Modell ist somit der dritten im Schrifttum vorgestellten Gruppe von Analyseansätzen: „Optimierungsmodelle ohne integrierte Gebäudesimulation“ zuzuordnen.

# Kapitel 5

## Entwicklung des *BRIAMO*-Modells

Gegenstand dieses Kapitels ist die Entwicklung des Modells „*BRIAMO*“ (*Building Refurbishment Investment Advising by Mathematical Optimization*). Hierfür ist die Entscheidungssituation eines Gebäudeeigentümers im Rahmen der Planung von Modernisierungsmaßnahmen in die mathematische Formulierung eines gemischt-ganzzahligen linearen Optimierungsproblems zu überführen. Die vorgesehene Modellierungsmethode „Energieflussgraph“ wurde bereits im Unterabschnitt 4.5.3.1<sup>s.91</sup> anhand des *PERSEUS*-Analyseansatzes kurz vorgestellt. Im Zuge der Übertragung auf die Entscheidungssituation „Wohngebäudemodernisierung“ sind einige Anpassungen und Erweiterungen erforderlich, welche im Zusammenhang mit den grundlegenden Vereinbarungen zur Abbildung der Energiesystemstruktur des Gebäudes, zur Gliederung des Analysezeitraums und zur Erfassung der Eigentümer- bzw. Investorstruktur in den Unterkapiteln 5.1 bis 5.3 erörtert werden.

Darauf aufbauend wird das Restriktionensystem für das *BRIAMO*-Modell erarbeitet. Der Fokus des Unterkapitels 5.4<sup>s.124</sup> liegt zunächst auf der Modellierung des Energieflussgraphen, bevor mit den Unterkapiteln 5.5<sup>s.126</sup> und 5.6<sup>s.143</sup> der Einstieg in die Abbildung der technischen und ökonomischen Aspekte der Modernisierungsentscheidung erfolgt. Die Nebenbedingungen zur Energiebilanzierung an den Knoten des Energieflussgraphen, die Konsistenzgleichungen zur Berücksichtigung verschiedener Zeitbezüge der Modellgrößen sowie die Restriktionen zur Zustandsausprägung<sup>113</sup> der Energieumwandlungsanlagen werden nahezu unverändert aus einem bestehenden *PERSEUS*-Modell<sup>114</sup> übernommen. Sie sind als wesentliche Modellbestandteile in den Abschnitten 5.4.2<sup>s.124</sup> und 5.5.1<sup>s.127</sup> der Vollständigkeit halber beschrieben.

Aufbauend auf diesen Grundbausteinen wird ein neuer Modellansatz entwickelt, der die gestellten Analyseanforderungen erfüllen kann. Die wesentliche Herausforderung

---

<sup>113</sup> Zum Begriffsverständnis siehe Abschnitt 4.5.1<sup>s.85</sup>.

<sup>114</sup> Vgl. [100/116/200].

besteht darin, die Modellentscheidungen unter Berücksichtigung der akteurspezifischen Rahmenbedingungen auf einen realitätskonformen Lösungsraum einzuengen. Gleichzeitig ist eine Problemlösung in vertretbaren Rechenzeiten zu gewährleisten. Als Schwerpunkte der formalen Modellentwicklung sind zu nennen:

- die Abbildung von Systemgestaltungsoptionen, die keine Energieumwandlungsanlagen darstellen, sowie die Erfassung des Hilfsenergiebedarfs (siehe Abschnitte 5.5.2 S. 128 bis 5.5.6 S. 138),
- die Verknüpfung der Modellentscheidungsgrößen zur Zustands- und Änderungsausprägung<sup>115</sup> der Systemoptionen (siehe Abschnitt 5.5.7 S. 139),
- die Formulierung des Finanzplans (siehe Abschnitt 5.6.1 S. 143),
- die Bestimmung der erforderlichen Anfangsauszahlungen und der Finanzierungsstruktur für die Maßnahmenumsetzung sowie die Berücksichtigung der Anforderungen für die Inanspruchnahme staatlicher Fördermittel (siehe Abschnitt 5.6.2 S. 146),
- die Bestimmung der laufenden Auszahlungen für Kapitaldienste, Instandhaltung und Anlagenbetrieb (siehe Abschnitte 5.6.3 S. 150 und 5.6.4 S. 153)
- die Bestimmung der laufenden Einzahlungen aus Gebäude- und KWK-/PV-Anlagenbewirtschaftung (siehe Abschnitte 5.6.5 S. 154 und 5.6.6 S. 156) sowie
- die Erfassung der AfA (siehe Abschnitt 5.6.7 S. 160).

Im letzten Unterkapitel 5.7 S. 162 erfolgt schließlich die Beschreibung der verschiedenen Zielfunktionen des Modells.

Der mathematische Modellteil von *BRIAMO* wird in der Optimierungssoftware *GAMS* umgesetzt. Aufgrund der Vielzahl der erforderlichen Restriktionen zur adäquaten Modellierung der betrachteten Entscheidungssituation werden in den folgenden Abschnitten nur die Wesentlichen formal dargestellt. Weitere Nebenbedingungen werden mit Verweis auf ihre Funktion lediglich im Text erwähnt. Die Angaben zum Geltungsbereich bzw. zu den Gültigkeitsbedingungen der Restriktionen werden aus Gründen der Übersichtlichkeit auf den obligatorischen Umfang beschränkt. Vereinzelt sind zusätzliche Bedingungen definiert, welche zur Reduktion der Problemgröße oder zur Beschleunigung des Modellaufbaus dienen. Eine Übersicht zu der im Folgenden verwendeten Symbolik ist in der Nomenklatur S. 255 ff. zu finden.<sup>116</sup>

---

<sup>115</sup> Zum Begriffsverständnis siehe Abschnitt 4.5.1 S. 85.

<sup>116</sup> Der vollständige mathematische *GAMS*-Code des *BRIAMO*-Modells kann am Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Institut für Industriebetriebslehre und Industrielle Produktion (IIP) eingesehen werden.

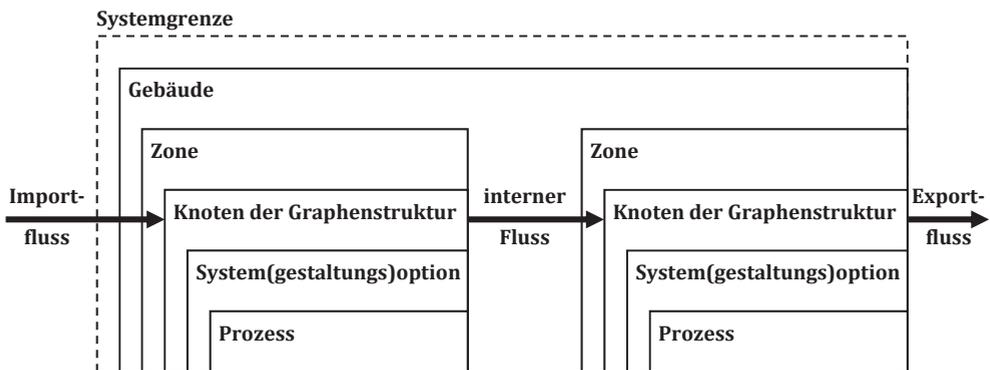
## 5.1 Modellierung der Gebäudeenergiesystemstruktur

Die Modellierung eines realen Systems erfordert zunächst die Klassifikation seiner einzelnen Bestandteile. Hierfür werden mit der folgenden Aufzählung Abbildungselemente definiert, die einer Hierarchie zur Strukturierung des betrachteten Energiesystems unterliegen (siehe Abbildung 8).

**Gebäude (b)** stellen die oberste Hierarchieebene dar. Für den Analysefall eines Einzelgebäudes entspricht diese Gliederungsstufe der Systemgrenze.<sup>117</sup>

**Zonen (z)** gliedern als zweithöchste Hierarchieebene ein Gebäude in einzelne ihm eindeutig zugewiesen Bereiche. Die Zonierung erfolgt unter den Gesichtspunkten der DIN 18599 Teil 1 zum Zusammenfassen von Räumen, die eine homogene Nutzung und Konditionierung aufweisen. Für die Modellierung werden als zusätzliche Zonierungskriterien definiert:

- einheitliche Eigentümer-Nutzer-Relation bezüglich Selbstnutzung, Vermietung oder Gemeinschaftseigentum und
- einheitliche ökonomische Rahmenbedingungen (insbesondere Mietpreise, ortsübliche Vergleichsmieten etc.).



**Abbildung 8:** Strukturelemente zur Modellierung des Gebäudeenergiesystems (in Anlehnung an [200 S. 83])

<sup>117</sup> Die Anwendungsfälle im Rahmen dieser Arbeit beschränken sich auf ein einzelnes Gebäude. Das Modell ist allerdings auch für eine Ausweitung der Analyse auf mehrere Gebäude ausgelegt. Die sich daraus ergebenden Analysemöglichkeiten werden im Unterkapitel 7.4 S. 228 kurz angerissen.

- Knoten ( $n$ )** repräsentieren vereinfacht betrachtet Gebäudebestandteile, Räume oder eine Komponente des Versorgungssystems (bspw. das Dach, den Hausanschlussraum oder die Wärmeverteilung) und sind jeweils eindeutig einer Zone zugewiesen.
- Flüsse** unterliegen zwar nicht der Systemhierarchie, können aber der Ebene der Knoten zugeordnet werden, welche sie als Kanten des Energieflussgraphen verbinden. Sie sind innerhalb der Systemgrenzen durch einen Startknoten  $n$  (Quelle), einen Zielknoten  $n'$  (Senke) und durch den transportierten Energieträger oder die transportierten Energieform  $ec$  charakterisiert. Modellentscheidungsgröße ist ihr Aktivitätslevel als Energie- bzw. Arbeitsgröße. Für den Energieeintrag in das betrachtete System hinein werden Importflüsse definiert. Dagegen repräsentieren Exportflüsse das Ende des gerichteten Energieflussgraphen und dienen als Treiber des Modells. Ein Knotenzufluss stellt seine Energie allen Systemoptionen im Zielknoten bereit. Entsprechend kann ein Knotenabfluss aus mehreren Systemoptionen des Startknotens gespeist werden.
- Systemoptionen ( $u$ )** stellen die technischen Anlagen und Bauteile dar (bspw. einen Wärmeerzeuger, ein Fenster oder eine Außenwanddämmung). Sie sind jeweils eindeutig einem Knoten zugeordnet und mit techno-ökonomischen Parametern hinterlegt (u. a. zu Anschaffungspreisen und technischen Nutzungsdauern). Modellentscheidungsgrößen sind ihre Zustands- und Änderungsausprägung (vgl. Tabelle 6<sup>S.87</sup>).
- Prozesse ( $p$ )** bilden die technische Funktionsweise der Systemoptionen ab, denen sie zugeordnet sind. Ihnen werden ebenfalls techno-ökonomische Parameter hinterlegt. Energieumwandlungsprozesse sind im Wesentlichen durch eine Inputenergie charakterisiert, die unter Berücksichtigung des vorgegebenen Wirkungsgrades in eine oder mehrere Outputenergien transformiert wird. Sonderformen stellen die Speicher-, Dämm-, Energiebedarfsprofil- und Hilfsenergieprozesse dar, die in den folgenden Abschnitten ausführlicher beschrieben werden. Die Modellentscheidungsgröße für die Prozesse stellt deren Aktivitätslevel als Energie- bzw. Arbeitsgröße dar, womit sie auch den zeitlichen Einsatz von Systemoptionen mit steuerbarem Betrieb widerspiegeln.

## 5.2 Modellierung der Analysezeitraumstruktur

Der Analysezeitraum wird in einzelne Modelljahre  $y$  untergliedert. Abgegrenzt wird er durch das Startjahr  $y^1$  und den Planungshorizont bzw. das Endjahr  $y^e$  (siehe Abbildung 9). Innerhalb des Analysezeitraumes werden einzelne Modelljahre  $ty$  definiert, in denen der Optimierungsalgorithmus Änderungen an der technischen Systemgestaltung vornehmen kann. Diese Änderungen sollen vereinfacht betrachtet ohne Dauer jeweils am Anfang dieser Modelljahre erfolgen und wirksam werden (Umsetzungszeitpunkt).

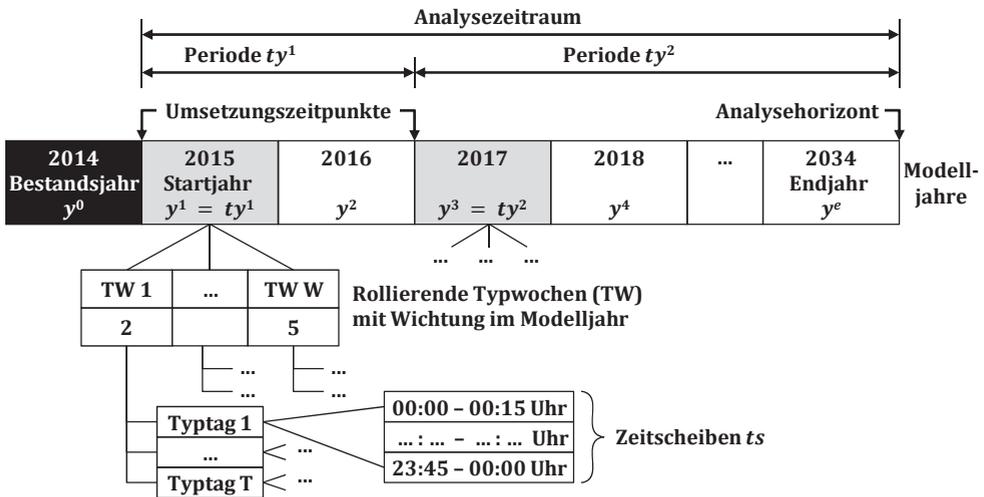


Abbildung 9: Modellierung der Analysezeitraumstruktur

Für den Zeitraum zwischen zwei Umsetzungszeitpunkten bleiben die Ausprägung der Systemoptionen und der Anlageneinsatz sowie der jährliche Energiebedarf unverändert.<sup>118</sup> Diese Zeiträume werden als (*Systemgestaltungs-*)Perioden bezeichnet, die jeweils dem Umsetzungszeitpunkt am Periodenanfang zugeordnet sind und deshalb ebenfalls durch den Index  $ty$  adressiert werden. Unabhängig von der Periodenlänge kann die Entwicklung ökonomischer Parameter (Energiepreise, Kreditkonditionen, Mieterwechselraten etc.) jährlich variierend vorgegeben werden. Dem Startjahr des Analysezeitraumes wird ein Bestandsjahr  $y^0$  vorangestellt, in dem der Systemausgangszustand mit der vorhandenen technischen Gebäudeausstattung und dem aktuellen Dämmstandard abgebildet wird. Gleiches gilt für die bestehenden ökonomischen Rahmenbedingungen (bspw. die aktuellen Mietpreise).

<sup>118</sup> Die Systemgestaltung des letzten Umsetzungszeitpunktes ist bis zum Analysehorizont maßgebend.

Zur Berücksichtigung der saisonal und tageszeitlich variierenden Energieinanspruchnahme wird jedem als Umsetzungszeitpunkt definierten Modelljahr eine unterjährige Zeitstruktur hinterlegt. Diese besteht aus repräsentativen Typtagen, die zu rollierenden Typwochen zusammengefasst werden.<sup>119</sup> Durch die Vorgabe eines Wichtungsfaktors wird die Häufigkeit der Typwoche im realen Jahresablauf festgelegt. Jeder Typtag wird in einzelne Zeitschritte gegliedert, welche im Folgenden als *Zeitscheiben* bezeichnet werden.

Für eine Zeitscheibe wird der Durchschnitt der in den dazugehörigen Zeitraum fallenden Leistungswerte eines realen Lastgangs betrachtet. Diese Vorgehensweise hat zur Folge, dass einzelne Lastspitzen und -senken ausgeglichen werden. Mit abnehmender Anzahl an Zeitscheiben würde die Analyse deshalb den Charakter einer energetischen Jahresbilanzierung für das Gebäude annehmen und die detaillierte Betrachtung des zeitlichen Anlageneinsatzes zunehmend einschränken. Dagegen würde eine sehr hohe zeitliche Auflösung eine Prognosesicherheit des Lastverlaufes unterstellen, die aufgrund der unmöglich exakt vorherzusehenden Einflussfaktoren (Außentemperaturen, Nutzerverhalten etc.) für größere Zeiträume nicht gegeben ist. Bei der Festlegung der unterjährigen Zeitstruktur ist deshalb ein geeigneter Mittelweg zu beschreiten, der durch die Vorgabe saisonal und tageszeitlich charakteristischer Profile für den Energiebedarf oder die Verfügbarkeit erneuerbarer Energien eine sinnvolle Analyse des Anlageneinsatz erlaubt und gleichzeitig den Rechenaufwand auf ein vertretbares Maß beschränkt.

### 5.3 Modellierung der Investor- und Finanzplanstruktur

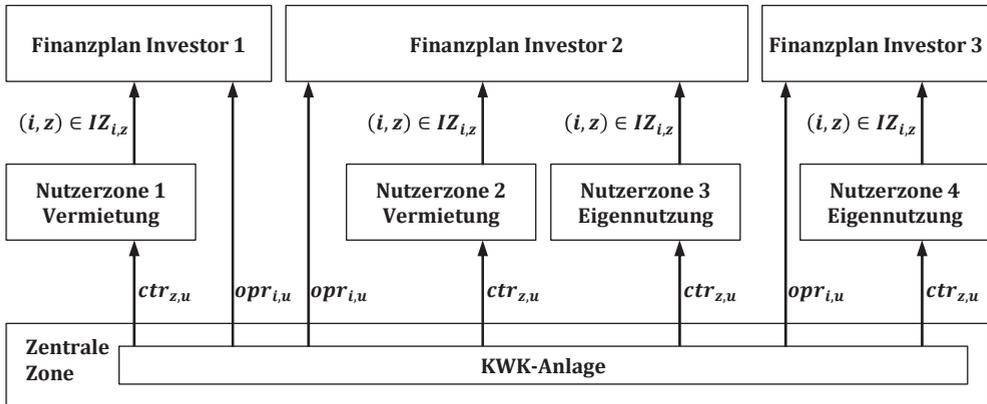
Das Modell ist sowohl für den Fall eines einzelnen Gebäudeeigentümers als auch für den Fall einer Eigentümergemeinschaft anwendbar. Gleichzeitig stellt die Betrachtung von verschiedenen Eigentümer-Nutzer-Relationen ebenso eine Analyseoption dar, wie der Betrieb von KWK- und PV-Anlagen. Um die Eigentumsverhältnisse sowie die unterschiedlichen rechtlichen und steuerlichen Gegebenheiten in der Bewertung der Handlungsoptionen berücksichtigen zu können, ist für jeden Investor in Abhängigkeit seiner Rolle als Eigennutzer und/oder Vermieter und gegebenenfalls Stromanlagenbetreiber eine separate Zahlungsfolge zu ermitteln.

---

<sup>119</sup> Die Vorgabe der unterjährigen Zeitstruktur kann vom Anwender frei gestaltet werden. Ein Typtag kann einen oder mehrerer reale Wochentage repräsentieren. Eine Typwoche repräsentiert jeweils einen bestimmten Abschnitt eines realen Jahres und muss nicht auf eine reale Woche beschränkt sein. Es gilt die Konvention, dass die Typtage entsprechend ihrer Vorgabereihenfolge direkt aufeinander folgen, wobei der letzte Typtag einer Typwoche direkt an den ersten Typtag derselben Typwoche anschließt.

Hierfür wird bei der Modellierung des Gebäudes zwischen selbstgenutzten Zonen  $Z^o$  und vermieteten Zonen  $Z^f$  unterschieden (siehe Abbildung 10). Zusammen bilden sie die *Nutzerzonen*, die jeweils eine einzelne Gebäudeteileneinheit oder mehrere hinsichtlich der Zonierungskriterien homogene Gebäudeteileneinheiten repräsentieren. Alle Flächen mit gemeinschaftlicher Nutzung werden dagegen in gebäudezentralen Zonen  $Z^c$  zusammengefasst, wie bspw. das Dach oder der Hausanschlussraum. Sämtliche Systemoptionen werden durch den Faktor  $ctr$  anteilmäßig den Nutzerzonen zugeordnet. Dezentrale Anlagen innerhalb einer Zone, wie bspw. eine Etagenheizung für eine Wohneinheit, sind dieser vollständig zugewiesen ( $ctr = 1$ ). Für gebäudezentrale Systemoptionen ist bei einheitlicher Nutzungsstruktur in der Regel das Flächenverhältnis der Zonen für den Anteilfaktor maßgebend.

Für jeden Investor wird ein eigener Finanzplan  $i \in I$  – im Folgenden auch als *Finanzplankonto* bezeichnet – erstellt. Ein Investor ist ein Gebäude(teil)eigentümer in Gestalt einer einzelnen Person oder einer Eigentümergemeinschaft.<sup>120</sup> Jede Nutzerzone wird eindeutig einem Finanzplankonto zugeordnet ( $(i, z) \in IZ$ ). Für den Fall des KWK- oder PV-Anlagenbetriebs wird zusätzlich der Faktor  $opr$  vorgegeben. Dieser Faktor drückt den Betreiberanteil des einzelnen Eigentümers an der Anlage aus, welcher in seinem Finanzplan zu erfassen ist.



$$\uparrow \text{Zuordnung} \quad \sum_{z \in (Z^o \cup Z^f)} ctr_{z,u} + \sum_{i \in I} opr_{i,u} = 1 \quad \forall u \in U$$

Abbildung 10: Modellierung der Investor- und Finanzplanstruktur

<sup>120</sup> Mehrere Eigentümer einer abgeschlossenen Wohneinheit werden generell als ein Investor betrachtet. Werden mehrere separate Gebäudeeinheiten mit unterschiedlichen Eigentümern zu einer Zone zusammengefasst, wird diese Eigentümergruppe ebenfalls als ein Investor betrachtet.

## 5.4 Modellierung des Energieflussgraphen

Durch den Energieflussgraphen werden die einzelnen Stufen des Gebäudeenergiesystems abgebildet und die Wirkungsbeziehungen zwischen ihnen hergestellt. Die dafür benötigten Nebenbedingungen werden zusammen mit der Modellierung des Gebäudeenergiebedarfs und der Energiebereitstellung an der Gebäudegrenze in den folgenden Abschnitten erläutert.

### 5.4.1 Modelltreiber – Deckung des Energiebedarfs

Treiber des Energieflussgraphen ist der zu deckende jährliche Nutzenergiebedarf des Bestandsgebäudes. Dieser Bedarf wird getrennt nach Nutzerzonen und den Energieanwendungen für Raumwärme, Warmwasser und gegebenenfalls Kälte in Form von einzelnen Exportflüssen modelliert. Die Exportflussaktivitäten sind Variablen des Optimierungsproblems. Die Vorgabe der erforderlichen Energiemengen für die einzelnen Energieanwendungen erfolgt durch die Fixierung der unterjährigen oder jährlichen Exportflussaktivitäten. Im Fall einer unterjährigen Fixierung ist die zeitliche Energieinanspruchnahme bei der Festlegung der Flussaktivität für die einzelnen Zeitscheiben zu berücksichtigen. Wird die jährliche Exportflussaktivität fixiert, verteilen vorgelagerte Bedarfsprofilprozesse diese Energiemenge durch vorzugebende Anteilsfaktoren  $lp$  auf die unterjährigen Zeitscheiben. Die sich daraus ergebende Bedarfsstruktur ist maßgebend für die Systemgestaltung und den Anlageneinsatz auf den vorgelagerten Stufen des Energieflussgraphen.

Die Modellierung des Heizwärmebedarfs, welcher aufgrund seiner Abhängigkeit von einzelnen Systemgestaltungsoptionen selbst Teil der Modellentscheidung ist, wird in den Abschnitten 5.5.4 <sup>S. 135</sup> und 5.5.5 <sup>S. 138</sup> vertieft. Der Bedarf für elektrische Energieanwendungen, für die keine Systemgestaltungsoptionen in die Untersuchung einbezogen werden, wird als aggregierte Endenergienachfrage für jede Nutzerzone exogen vorgegeben. Der elektrische Antriebs- bzw. Hilfsenergiebedarf von Systemgestaltungsoptionen kann dagegen in Abhängigkeit des Anlageneinsatzes endogen bestimmt werden (siehe Abschnitt 5.5.6 <sup>S. 138</sup>).

### 5.4.2 Knotenenergiebilanzgleichungen und Konsistenzgleichungen zur Berücksichtigung verschiedener Zeitbezüge

Die Knotenenergiebilanzgleichungen dienen zur Einhaltung der durch den Energieflussgraphen abgebildeten Wirkungsketten. Durch sie wird für jeden Knoten des Netzwerkes das energetische Gleichgewicht zwischen seinen Zu- und Abflüssen innerhalb eines Modellzeitschritts gewahrt (siehe Gleichung 5.1).

$$\begin{aligned}
& FA_{n,ec,ty,ts}^{imp} + \sum_{\substack{n' \in N: \\ n \neq n'}} FA_{n',n,ec,ty,ts}^{int} + \sum_{\substack{p \in P: \\ \exists (n,p) \in NP_{n,p}}} of_{p,ec,ty} \cdot PA_{p,ty,ts} \\
= & FA_{n,ec,ty,ts}^{exp} + \sum_{\substack{n' \in N: \\ n \neq n'}} FA_{n,n',ec,ty,ts}^{int} \\
& + \sum_{\substack{p \in P^{lp}: \\ \exists (n,p) \in NP_{n,p}}} \left( \frac{if_{p,ec,ty} \cdot lp_{p,ty,ts}}{eff_{p,ty}} \cdot PA_{p,ty}^y \right) + \sum_{\substack{p \in P \setminus P^{lp}: \\ \exists (n,p) \in NP_{n,p}}} \left( \frac{if_{p,ec,ty}}{eff_{p,ty}} \cdot PA_{p,ty,ts} \right) \\
& \forall n \in (N \setminus (N^{hst} \cup N^{est})); \forall ec \in EC; \forall ty \in TY; \forall ts \in TS
\end{aligned} \tag{5.1}$$

Die Nebenbedingung fordert, dass die abfließende Energiemenge durch deren Bereitstellung als Prozessoutput im Knoten und/oder direkt durch entsprechende Knotenzuflüsse gedeckt werden muss. Gleichzeitig wird sichergestellt, dass die zufließende Energiemenge durch entsprechende Knotenabflüsse und/oder durch Prozesse im Knoten aufzunehmen ist (Prozessinput). Im Falle der Energietransformation stellen damit die Aktivitätsniveaus der Prozesse die verknüpfende Modellgröße zwischen den Knotenzuflüssen und den Knotenabflüssen dar. Eine zweite, ähnlich aufgebaute Gleichung beschränkt sich auf die Bilanzierung der Jahresenergiemengen ohne die unterjährige Zeitscheibenstruktur zu berücksichtigen. Diese Nebenbedingung wird nur zur Berücksichtigung jährlicher Exportflussaktivitäten benötigt oder für Importflüsse angewendet, für die eine unterjährige Betrachtung der Flussaktivität nicht entscheidungsrelevant ist [100/116/200].

Zur Sicherstellung der Konsistenz zwischen unterjährigen und jährlichen Aktivitätsvariablen gewährleisten Nebenbedingungen, dass die Summe der Aktivitäten aller Zeitscheiben eines Jahres der Gesamtjahresaktivität entsprechen muss. Nebenbedingung 5.2 zeigt diese Forderung für die Prozessaktivität. Analoge Restriktionen sind für die Variablen der unterjährigen und jährlichen Flussaktivitäten formuliert [100/116/200].

$$PA_{p,ty}^y = \sum_{ts \in TS} PA_{p,ty,ts} \quad \forall p \in P; \forall ty \in TY \tag{5.2}$$

### 5.4.3 Energiebereitstellung an der Gebäudegrenze

Der Energiebezug über die Hausanschlüsse (Gas, elektrische Energie, Fernwärme etc.) im Rahmen eines Liefervertrages mit einem EVU bzw. Brennstoffhändler wird mithilfe von Importflüssen für das Gebäudeenergiesystem modelliert. In der Regel genügt die Betrachtung der beanspruchten Jahresenergiemengen. Eine unterjährige Aufschlüsselung ist nur zur Berücksichtigung tageszeitlich oder saisonal variierender Energiepreise sinnvoll, wie sie bspw. bei einem Zweitarifvertrag für elektrische Energie oder bei speziellen Gasbezugsverträgen anzutreffen sind. Das Modell bietet die Möglichkeit, derartige Optionen in die Analyse einzubeziehen. Durch die Importflüsse werden auch die direkt am Gebäude zur Verfügung stehenden Umweltenergien bspw. zur Nutzung von PV- und Solarthermieanlagen abgebildet.

Für den umgekehrten Energiebereitstellungsfall an der Gebäudegrenze, d. h. für die Einspeisung von im Objekt erzeugter elektrischer Energie ins öffentliche Netz, werden dagegen Exportflüsse mit unbeschränktem Aktivitätsniveau definiert. Zur Berücksichtigung saisonal variierender Einspeisevergütungen (bspw. quartalsweise für elektrische Energie aus KWK) kann das Exportflussniveau gegebenenfalls unterjährig differenziert betrachtet werden.

## 5.5 Modellierung der technischen Entscheidungsaspekte

Nachdem die Regelungen zur Modellstruktur vereinbart sind und der grundsätzliche Aufbau des Energieflussgraphen erläutert wurde, erfolgt mit diesem Unterkapitel der Einstieg in die Abbildung der technischen Aspekte der Modernisierungsentscheidung. Gegenstand der Betrachtung ist zunächst die Modellierung der einzelnen Systemgestaltungsoptionen. Dargestellt sind jeweils nur wesentliche Nebenbedingungen zur Beschreibung ihrer Wirkungsweise und zur Bestimmung ihrer Zustandsausprägungen. Ihre Einbettung in den Energieflussgraphen wird ebenfalls kurz angerissen. Begonnen wird mit den Anlagen zur Energieumwandlung und -speicherung. Anschließend wird auf die Modellierung der Wärmeverteilung und die Maßnahmen eingegangen, welche den Heizwärmebedarf beeinflussen. Die beiden letzten Abschnitte des Unterkapitels befassen sich mit der Ermittlung des Hilfsenergiebedarfs und der Vorgehensweise zur Erfassung der Systementwicklung.

### 5.5.1 Energieumwandlungsanlagen

Die erforderliche Zustandsausprägung (auch *Kapazität*) der Energieumwandlungsanlagen wird anhand ihrer Aktivität bestimmt. Nebenbedingung 5.3 gewährleistet, dass die Kapazität einer Anlage in jedem Modellzeitschritt mindestens der aggregierten Leistungsabgabe der ihr zugeordneten Prozesse entsprechen muss [100/116/200].

$$CAP_{u,ty} \cdot avail_{u,ty,ts} \geq \frac{\sum_{\substack{p \in P \setminus P^{aux}: \\ \exists (u,p) \in UP_{u,p}}} (PA_{p,ty,ts} \cdot cap_{p,ty}^{ref})}{dr_{ts}^{tsa}} \quad (5.3)$$

$$\forall u \in U : \exists (n, u) \in NU_{n,u} : n \in (N^{clad} \cup N^{hst} \cup N^{est}); \forall ty \in TY; \forall ts \in TS$$

Der Faktor  $cap^{ref}$  bietet die Möglichkeit, die Kapazitätsbestimmung bei Kuppelproduktion auf einen Teilprozessoutput zu beziehen (bspw. auf den elektrischen Output einer KWK-Anlage). Der Faktor  $avail$  dient zur zeitweisen Beschränkung der verfügbaren Anlagenkapazität als Anteil an der installierten Kapazität. Durch die unterjährige Variation von  $avail$  wird u. a. die fluktuierende Energiebereitstellung einer Solarenergieanlage modelliert. Abbildung 11 zeigt schematisch einen Knoten des Energieflussgraphen mit Energieumwandlungsanlagen.

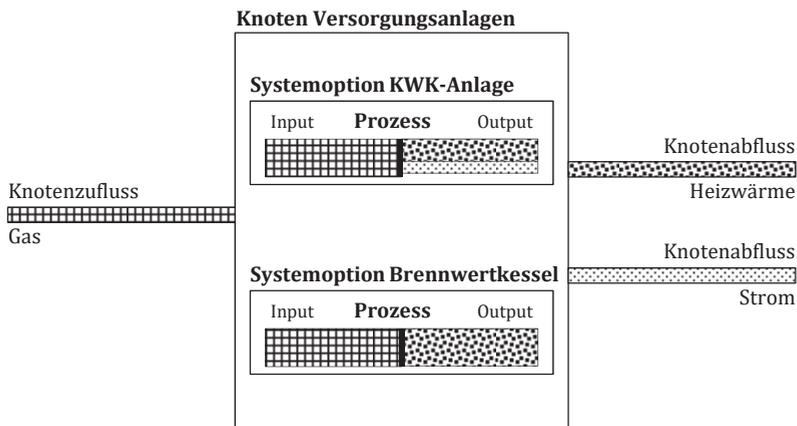


Abbildung 11: Modellierung von Energieumwandlungsanlagen

## 5.5.2 Energiespeicher

Im Modell können sowohl thermische als auch elektrische Speicher als Systemgestaltungsoption vorgegeben werden. Aufgrund ihrer spezifischen Charakteristika sind sie getrennt nach der Energieform in gesondert gekennzeichneten Speicherknoten ( $N^{hst}$  für Wärme,  $N^{est}$  für Strom) zu definieren. Die Vorgabe erfolgt grundsätzlich analog zu der von Energieumwandlungsanlagen. Im einfachsten Fall wird ein Speicher als Anlage mit einem Prozess definiert, dessen Aktivität den Energieinhalt nach Befüllung und/oder Entladung in einer Zeitscheibe repräsentiert (siehe Abbildung 12).

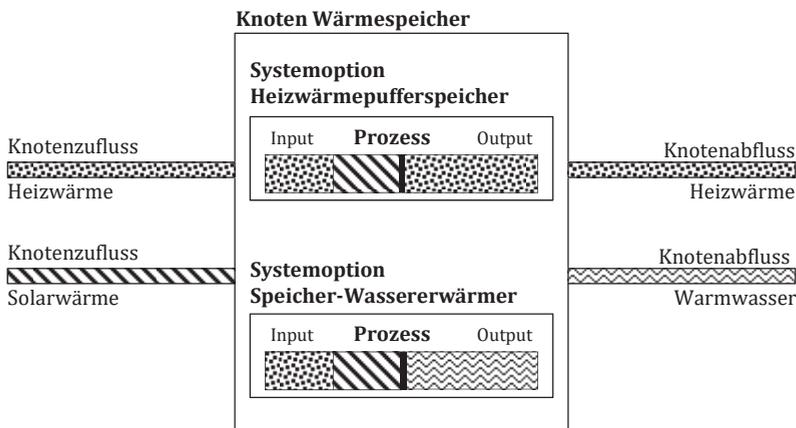


Abbildung 12: Modellierung von Energiespeichern

Bei Vorgabe von Zu- und Abflüssen mit identischen Energieträgern bzw. -formen am Speicherknoten wird der entsprechende Speicherprozess genutzt, wenn zu einem Zeitpunkt Energie gespeichert werden soll. Nur in diesem Fall wird eine Zustandsausprägung größer null für den dazugehörigen Speicher gefordert. Soll dagegen ein Knotenzufluss genutzt werden, der ausschließlich unter Verwendung des Speicherprozesses einen Knotenabfluss decken kann, wird in jedem Fall eine Zustandsausprägung größer null für den Speicher gefordert. Diese Abbildungsweise ist für Versorgungssysteme anzuwenden, die üblicherweise das Vorhandensein eines Speichers erfordern. Ein Beispiel dafür sind bivalente Speicher-Wassererwärmer mit Nutzung von Solarthermie.

Die im Folgenden beschriebenen Bilanzgleichungen gelten einheitlich für alle Energiespeicher im Untersuchungsraum. Auf die spezifischen Modellierungscharakteristika von elektrischen und thermischen Speichern wird im Anschluss daran eingegangen.

### 5.5.2.1 Energiebilanz an Speicherknoten

Eine sinnvolle Berücksichtigung von Energiespeichern im Gebäude erfordert eine detaillierte Betrachtung ihrer Betriebsweise. Die Bilanzierung an Speicherknoten erfolgt deshalb ausschließlich auf der Ebene der unterjährigen Zeitscheiben. Da Nebenbedingung 5.1<sup>s. 125</sup> ein Ausgleich zwischen den am Knoten anliegenden Zu- und Abflüssen innerhalb jeder Zeitscheibe fordert, ist für Knoten mit Speicheranlagen durch Nebenbedingung 5.4 eine abgewandelte Energiebilanzierung vorzugeben.

$$\begin{aligned}
 & FA_{n,ec,ty,ts}^{imp} + \sum_{\substack{n' \in N: \\ n \neq n'}} FA_{n',n,ec,ty,ts}^{int} + \sum_{\substack{p \in P: \exists (n,p) \in NP_{n,p} \wedge \\ of_{p,ec,ty} \neq 0}} SD_{p,ec,ty,ts} & (5.4) \\
 = & FA_{n,ec,ty,ts}^{exp} + \sum_{\substack{n' \in N: \\ n \neq n'}} FA_{n,n',ec,ty,ts}^{int} + \sum_{\substack{p \in P: \exists (n,p) \in NP_{n,p} \wedge \\ if_{p,ec,ty} \neq 0}} SC_{p,ec,ty,ts} \\
 & \forall n \in (N^{hst} \cup N^{est}); \forall ec \in EC; \forall ty \in TY; \forall ts \in TS
 \end{aligned}$$

Äquivalent zur Nebenbedingung 5.1 können an Speicherknoten innerhalb einer Zeitscheibe Abflüsse direkt durch Zuflüsse mit identischem Energieträger bzw. identischer Energieform gedeckt werden. Auf der Zuflussseite überschüssige Energiemengen können eingespeichert, fehlende Energiemengen auf der Abflusseite durch Entladung der Speicher ausgeglichen werden. Zu erkennen ist, dass im Unterschied zu den Umwandlungsprozessen die Parameter *if* und *of* lediglich zur Spezifikation des In- und/oder Outputs eines Speicherprozesses dienen und nicht als Faktoren in die Speicherknotenbilanz eingehen. Demzufolge können alle Inputenergien eines Prozesses den Speicher unabhängig voneinander laden, alle Outputenergien unabhängig voneinander entladen.

Die verbindende Modellgröße zwischen dem Ein- und Ausspeichern ist die Prozessaktivität *SL*, welche die Energiespeicherung zwischen zwei Zeitschritten repräsentiert. Diese wird durch Gleichung 5.5 bestimmt und ergibt sich aus der gespeicherten Energie in der direkt vorgelagerten Zeitscheibe sowie aus der Summe aller Aufladungen *SC* und Entladungen *SD* in der betrachteten Zeitscheibe.<sup>121</sup>

<sup>121</sup> Entsprechend der Festlegungen zur Strukturierung des Analysezeitraums im Unterkapitel 5.2<sup>s. 121</sup> geht das Speicherlevel der letzten Zeitscheibe einer Typwoche in die Bilanzierung des Speicherlevels der ersten Zeitscheibe derselben Typwoche ein.

$$\begin{aligned}
SL_{p,ty,ts} = & SL_{p,ty,ts-1} \cdot \left( 1 - \sum_{\substack{u \in U: \exists (u,p) \in UP_{u,p} \wedge \\ \exists (n,u) \in NU_{n,u}: n \in N^{hst}}} \frac{hlf_{u,ty} \cdot dr_{ts-1}^{tsd}}{seg_{u,ty} \cdot shc_{u,ty}} \right) \\
& + eff_{p,ty,ts}^{sc} \cdot \sum_{\substack{ec \in EC: \\ if_{p,ec,ty} \neq 0}} SC_{p,ec,ty,ts} \\
& - \frac{1}{eff_{p,ty,ts}^{sd}} \cdot \sum_{\substack{ec \in EC: \\ of_{p,ec,ty} \neq 0}} SD_{p,ec,ty,ts} \\
& \forall p \in P : \exists (n,p) \in NP_{n,p} : n \in (N^{hst} \cup N^{est}); \forall ty \in TY; \forall ts \in TS
\end{aligned} \tag{5.5}$$

Ein- bzw. Ausspeicherverluste, wie sie bspw. bei Akkumulatoren auftreten, werden durch die Faktoren  $eff^{sc}$  bzw.  $eff^{sd}$  abgebildet. Die Verluste von thermischen Speichern in Abhängigkeit der gespeicherten Energiemenge und der daraus resultierenden Speicherinnentemperatur werden beim Energieübertrag aus der vorgelegerten Zeitscheibe erfasst. Hierfür werden die Wärmeverlustrate  $hlf$  sowie die Speicherdauer berücksichtigt. Letztere entspricht der einfachen Dauer  $dr^{tsd}$  der vorangegangenen Zeitscheibe.

### 5.5.2.2 Speicher für elektrische Energie

Die erforderliche Zustandsausprägung für Elektroenergiespeicher wird durch Ungleichung 5.6 als Speicherkapazität in kWh bestimmt.

$$CAP_{u,ty} \cdot avail_{u,ty,ts} \geq \frac{dr_{ts}^{tsd}}{dr_{ts}^{tsa}} \cdot \sum_{\substack{p \in P: \\ \exists (u,p) \in UP_{u,p}}} SL_{p,ty,ts} \tag{5.6}$$

$$\forall u \in U : \exists (n,u) \in NU_{n,u} : n \in N^{est}; \forall ty \in TY; \forall ts \in TS$$

Abnahmeraten der zur Verfügung stehenden Speicherkapazität über die Zeit (Kapazitätsdegression) können mit dem Verfügbarkeitsfaktor  $avail$  vereinfacht berücksichtigt werden. Gleichzeitig kann der Faktor aber auch für die Modellierung zeitlich

beschränkt zur Verfügung stehender Speicher in vorhandenen Elektrofahrzeugen der Gebäudenutzer dienen.<sup>122</sup> Mithilfe weiterer, hier nicht dargestellter Nebenbedingungen kann auch die maximale Lade- und Entladeleistung der Speicher begrenzt werden.

### 5.5.2.3 Wärmespeicher

Die Betrachtung ausschließlich energetischer Flussgrößen innerhalb des Gebäudeversorgungssystems erfordert für eine möglichst realitätsnahe Modellierung von thermischen Speichern zusätzliche Konventionen. Als Zustandsausprägung von Wärmespeichern wird die Masse ihres Speichermediums betrachtet. Um die benötigte Speichermasse aus der Energiespeicherung der zugeordneten Prozesse ableiten zu können, werden diese Anlagen durch die maximal zugelassene Innentemperatur  $tmp^{max}$  sowie die spezifische Wärmekapazität  $shc$  des Speichermediums charakterisiert.<sup>123</sup> Weiterhin wird eine Bezugstemperatur benötigt, welche das „Null-Energielevel“, d. h. den leeren Speicher repräsentiert. Diese wird vor dem Hintergrund, dass die Speicherinnentemperatur durch Standverluste nicht unter das Umgebungsniveau sinken kann, auf die Temperatur des Speicheraufstellortes  $tmp^n$  festgelegt.

Zur Bestimmung der Speichermasse fordert Nebenbedingung 5.7, dass diese in jeder Zeitscheibe mindestens die aggregierte Energiespeicherung aller Speicherprozesse innerhalb der Temperaturspreizung zwischen Knotentemperatur und maximaler Speicherinnentemperatur aufnehmen kann.

$$CAP_{u,ty} \cdot avail_{u,ty,ts} = \frac{dr_{ts}^{tsd}}{dr_{ts}^{tsa} \cdot shc_{u,ty}} \cdot \frac{\sum_{\substack{p \in P: \\ \exists (u,p) \in UP_{u,p}}} SL_{p,ty,ts}}{tmp_{u,ty}^{max} - \sum_{\substack{n \in N: \\ \exists (n,u) \in NU_{n,u}}} tmp_{n,ty,ts}^n} \quad (5.7)$$

$$\forall u \in U : \exists (n,u) \in NU_{n,u} : n \in N^{hst}; \forall ty \in TY; \forall ts \in TS$$

<sup>122</sup> Zur Berücksichtigung von Elektrofahrzeugen können zusätzlich die vorhandenen Ladezustände zu Beginn und gegebenenfalls die erforderliche Ladezustände zum Ende eines Verfügbarkeitszeitfensters über Variablenschranken definiert werden. Gleiches gilt für die vorhandene Gesamtkapazität dieser mobilen Speicher, die keine Modellentscheidung darstellt und exogen vorzugeben ist.

<sup>123</sup> Die spezifische Wärmekapazität, die Dichte und der Druck werden vereinfacht als konstant über den zulässigen Innentemperaturbereich des Speichers angenommen.

Zur Berücksichtigung der notwendigen Systemtemperaturen bei der Speicherentladung (bspw. Vorlauftemperatur im Heizkreislauf oder Zapftemperaturen für Warmwasser) dient Nebenbedingung 5.8. Diese stellt sicher, dass eine Ausspeicherung nur oberhalb einer vorzugebenden Mindesttemperatur  $tmp^{smi\text{n}}$  erfolgen darf, indem sie fordert, dass in den entsprechenden Zeitscheiben wenigstens die Energiemenge im Speicher verbleibt, welche mit der Mindestabgabetemperatur einhergeht. Erfolgt keine Ausspeicherung, kann der Energieinhalt des Speichers aufgrund von Standverlusten aber bis zum Null-Energielevel absinken.

$$\begin{aligned}
 SL_{p,ty,ts} \geq & \frac{cap_{p,ty}^{ref} \cdot dr_{ts}^{tsa}}{dr_{ts}^{tsd}} \cdot \left( tmp_{p,ty,ts}^{smi\text{n}} - \sum_{\substack{n \in N: \\ \exists (n,p) \in NP_{n,p}}} tmp_{n,ty,ts}^n \right) \\
 & \cdot \sum_{\substack{u \in U: \\ \exists (u,p) \in UP_{u,p}}} (CAP_{u,ty} \cdot shc_{u,ty}) + big \cdot (bSD_{p,ty,ts} - 1) \\
 & \forall p \in P : \exists (n,p) \in NP_{n,p} : n \in N^{hst}, \forall ty \in TY; \forall ts \in TS; big > SL_{p,ty,ts}
 \end{aligned} \tag{5.8}$$

Die endogene Betrachtung der Ausspeicherung mithilfe der Binärvariable  $bSD$ , welche durch eine weitere Nebenbedingung im Falle einer Speicherentladung den Wert eins annimmt, erhöht erheblich den Umfang des Optimierungsproblems. Für Wärmespeicher bei denen die Abgabezeiten festgelegt sind (bspw. durch fixe Betriebszeiten einer Zirkulationsanlage) kann deshalb auf eine alternative Form der Nebenbedingung 5.8 zurückgegriffen werden. Diese wird nur für die entsprechenden Zeitscheiben definiert und verzichtet auf den Term der Binärvariablen. Zur Legionellenabwehr kann mithilfe einer letzten Restriktion zur Wärmespeicherabbildung sichergestellt werden, dass die Speicherinnentemperatur mindestens einmal innerhalb eines vorzugebenden Zeitraums 60 °C überschreitet.

Neben Mischspeichern, mit nahezu einheitlicher Innentemperatur, besteht auch die Möglichkeit zur vereinfachten Modellierung von Speichervarianten mit Bereitschaftsvolumen und Schichtladung. Hierfür sind dem Speicher mehrere Prozesse zuzuweisen, die in Abhängigkeit des Faktors  $cap^{ref}$  jeweils einen Teil der Gesamtspeichermasse repräsentieren. Diese Speicherprozesse können unabhängig voneinander be- bzw. entladen werden, wobei das erforderliche Energieniveau zur Erreichung der Mindestabgabetemperatur bezüglich des jeweiligen Masseanteils ermittelt wird. Die maximale Innentemperatur ist dagegen nur für die Gesamtspeichermasse relevant.

Wird  $tmp^{max}$  innerhalb eines Speicherbereiches erreicht, ist eine weitere Energieeinspeicherung in den dazugehörigen Prozess als zunehmende Erwärmung der angrenzenden Bereiche zu interpretieren. Damit ist auch das „Durchheizen“ des gesamten Speichers durch einen einzelnen Prozess abbildbar, welcher bspw. aus einer Solarthermieanlage gespeist wird.

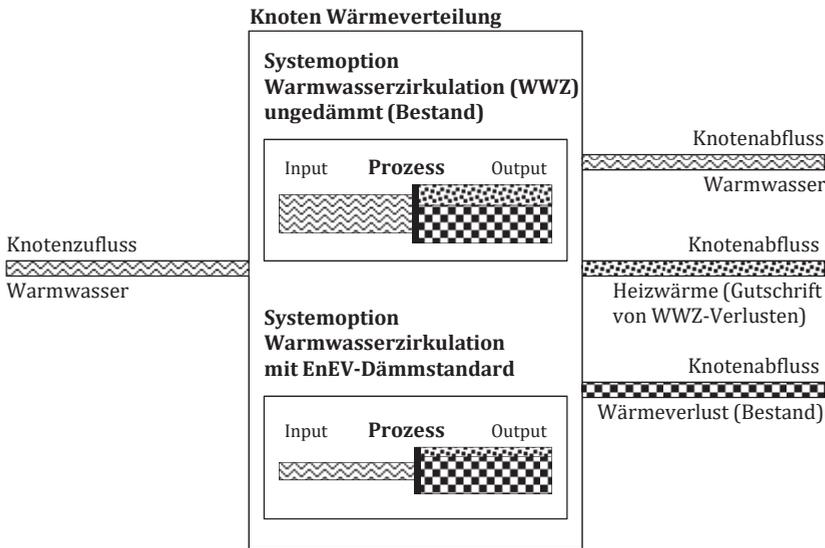
#### 5.5.2.4 Latentwärme- und Kältespeicher

Die Wärmespeichermodellierung kann im Prinzip auch zur Abbildung von Kälte- und Latentwärmespeichern mit kurzfristiger Speicherdauer genutzt werden. Bei einem Kältespeicher geht die Speicherentladung nicht mit der Senkung sondern mit der Steigerung der Innentemperatur einher und die entnahmeunabhängigen Verluste begründen sich durch ungewollte Wärmegewinne. Dementsprechend sind die Temperaturparameter bei der Abbildung vorzugeben. Als Bezugstemperatur für das Null-Energielevel wird wiederum die Bezugstemperatur des Aufstellortes definiert, über welche die Speicherinnentemperatur durch Standgewinne nicht steigen kann. Zur Ermittlung der Speichermasse nach Nebenbedingung 5.7 entspricht der Parameter  $tmp^{max}$  der Summe aus  $tmp^n$  und dem Temperaturdelta zwischen  $tmp^n$  und der minimal möglichen Speicherinnentemperatur.

Zur Modellierung von Latentwärmespeichern wird die Temperaturspreizung zwischen  $tmp^n$  und  $tmp^{max}$  vereinfacht auf 1 Kelvin festgelegt sowie mit  $shc$  die aufgenommene bzw. frei werdende Energiemenge beim Phasenübergang vorgegeben. Zusätzlich kann für nicht steuerbare Speichervorgänge (bspw. bei PCM-Putzen) die Be- und Entladung näherungsweise durch eine zeitliche Beschränkung der Zu- und Abflussaktivitäten am Speicherknoten vorgegeben werden.

#### 5.5.3 Gebäudeinterne Wärmeverteilung

Die Modellierung der Wärmeenergieverteilung aus gebäudezentralen Versorgungsanlagen dient vorrangig zur Berücksichtigung der dabei entstehenden Verluste. Stellt die Dämmung der Versorgungsleitungen eine Handlungsoption dar, werden die einzelnen Dämmvarianten als separate Systemoptionen mit jeweils spezifischen Kenngrößen in einem Wärmeverteilungsknoten modelliert. Abbildung 13 zeigt schematisch ein Beispiel für die Warmwasserverteilung mit zwei Dämmvarianten. Erfolgt die Versorgung – wie hier unterstellt – über ein Zirkulationssystem mit festen Betriebszeiten, werden die dabei entstehenden entnahmeunabhängigen Wärmeverluste in den einzelnen Zeitscheiben als zusätzlicher Exportfluss vorgegeben.



**Abbildung 13:** Modellierung von Dämmmaßnahmen für eine zentrale Warmwasserverteilung mit Zirkulation

Wie in Abbildung 13 zu erkennen ist, wird der zu befriedigende Warmwasserbedarf der angeschlossenen Zonen (Knotenabfluss) direkt durch den Knotenzufluss ohne die Nutzung der Wärmeverteilungsprozesse gedeckt. Der Treiber für die Aktivität der Wärmeverteilungsprozesse ist ausschließlich der Exportfluss für den Zirkulationsverlust. Der Input der Wärmeverteilungsprozesse erhöht so die Aktivität des Knotenzuflusses um die Verteilungsverluste, welche durch die vorgelagerten Umwandlungs- bzw. Speicheranlagen zur Warmwasserversorgung zusätzlich bereitzustellen sind.

Durch die Definition eines zweiten Outputs für die Wärmeverteilungsprozesse gelingt die Erfassung der Heizwärmegutschrift aus den Zirkulationsverlusten, welche die bereitzustellende Heizwärme aus den Versorgungsanlagen reduziert. Die Vorgaben für den Prozesswirkungsgrad  $eff$  sowie die einzelnen Input- und Outputfaktoren ( $if$  und  $of$ ) sind in Abhängigkeit des Dämmstandards der einzelnen Varianten aufeinander abzustimmen.

Bei einer Wärmeverteilung ohne Zirkulation oder mit bedarfsgesteuerter Zirkulation (d. h. mit variablen Betriebszeiten) kann auf die Vorgabe des Exportflusses zur Abbildung der entnahmeunabhängigen Verluste verzichtet werden. Die Verluste bei der Warmwasserentnahme werden dann vereinfacht über den Wirkungsgrad der Wärmeverteilungsprozesse erfasst.

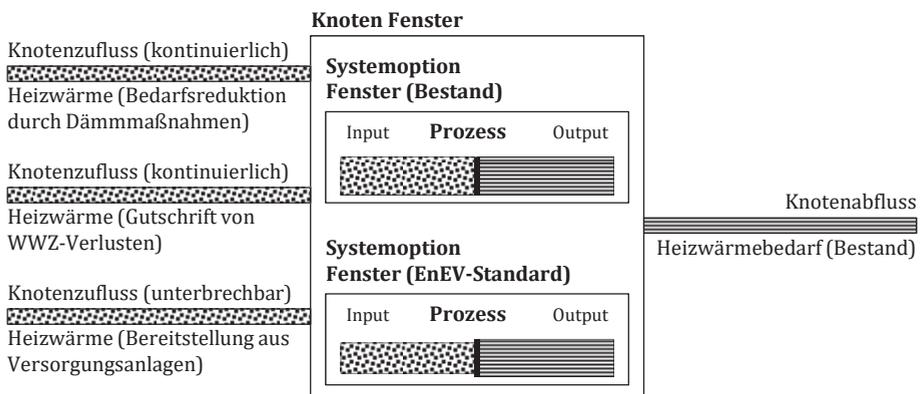
## 5.5.4 Maßnahmen an der Gebäudehülle

Modernisierungsmaßnahmen an der Gebäudehülle wirken sich sowohl auf den jährlichen Heizwärmebedarf als auch auf die unterjährige Heizlaststruktur aus. Das Modell erlaubt, die Handlungsoptionen differenziert nach Bauteilen bzw. Bauteilgruppen zu betrachten. Hierfür ist die Modellierungsmethodik auf die Berücksichtigung der einzelnen und kombinierten Maßnahmeneffekte hinsichtlich des Heizwärmebedarfs ausgerichtet. Die Ermittlung der benötigten Parameter kann mit Hilfe eines Gebäudesimulationstools erfolgen. Grundsätzlich ist bei der Modellierung der Maßnahmenoptionen an der Gebäudehülle zwischen transparenten und opaken Flächen zu unterscheiden.

### 5.5.4.1 Transparente Flächen

Verschiedene Fenster- bzw. Bauteilvarianten für transparente Hüllflächen weisen konstruktionsbedingt nur sprunghafte Änderungen der energierelevanten Parameter (U-Wert und g-Wert) auf. Gleichzeitig haben die vom g-Wert abhängigen solaren Wärmegewinne einen signifikanten Einfluss auf die Heizlaststruktur des Gebäudes. Eine kontinuierliche Betrachtung dieser Ausprägungen ist daher nicht zweckmäßig. Sowohl die vorhandenen Bauteile im Gebäudeausgangszustand als auch die möglichen Austauschvarianten werden deshalb als einzelne Systemoptionen mit jeweils fixen bauphysikalischen Parametern modelliert.

Die Abbildung erfolgt in einem zentralen Knoten. Dieser Knoten stellt die Quelle eines Exportflusses dar, dessen jährliches Aktivitätsniveau für den Analysezeitraum auf den jährlichen Heizwärmebedarf der zugeordneten Zonen bei unverändertem Ausgangszustand der thermischen Hüllflächen fixiert wird (siehe Abbildung 14).

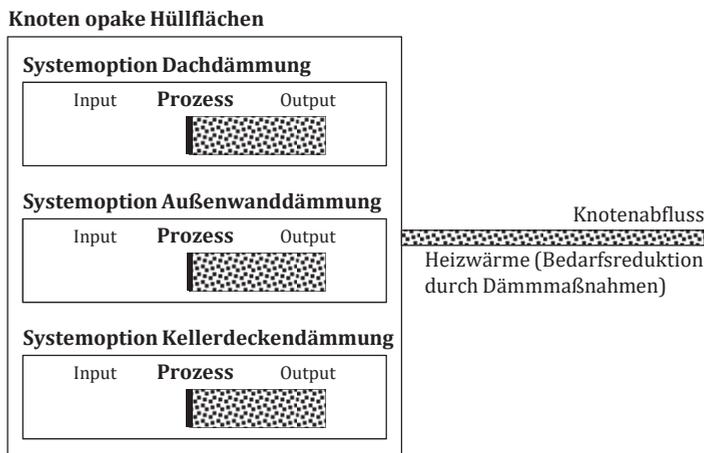


**Abbildung 14:** Modellierung des Heizwärmebedarfs – Fenster bzw. transparente Hüllflächen

Jeder Fenstervariante wird ein Bedarfsprofilprozess  $p \in P^{lp}$  zur Deckung des Exportflusses zugeordnet. Das hinterlegte Bedarfsprofil spiegelt die fensterspezifische Heizlaststruktur wider und berücksichtigt gleichzeitig die Reduktion des jährlichen Heizwärmebedarfs gegenüber dem Ausgangszustand des Gebäudes. Das unterjährige Aktivitätsniveau des Knotenzufusses repräsentiert damit den von der gewählten Fenstervariante abhängigen Heizwärmebedarf in jeder Modellzeitscheibe, welcher durch die Versorgungsanlagen bereitzustellen ist, wenn auf eine Änderung des Dämmstandards der opaken Gebäudehüllflächen verzichtet wird.

#### 5.5.4.2 Opake Flächen

Die Dämmmaßnahmen an opaken Flächen werden getrennt nach einzelnen Bauteilen (bspw. Außenwand, Kellerdecke, Dach) in einem speziellen zentralen Gebäudehüllknoten  $n \in N^{clad}$  definiert. Als Zustandsausprägung für diese Systemoptionen wird die U-Wert-Verringerung der entsprechenden Bauteile gegenüber ihrem ungedämmten Zustand oder ihrem Dämmstandard im Ausgangszustand betrachtet. Die Wirkungsweise der Dämmungen wird durch Prozesse abgebildet, deren Output den resultierenden Heizwärmebedarf der gewählten Fenstervariante teilweise decken kann. Sie reduzieren damit den verbleibenden Anteil des Heizwärmebedarfs der Zonen, welcher letztendlich durch die Wärmeversorgungsanlagen bereitzustellen ist. Eine schematische Darstellung der Modellierung im Energieflussgraphen ist in Abbildung 15 widergegeben. Da es sich bei diesen Maßnahmen nicht um Energieumwandlungsanlagen handelt, werden Gebäudehüllknoten ohne Zuflüsse und die dazugehörigen Dämmprozesse nur mit dem Output vorgegeben.



**Abbildung 15:** Modellierung des Heizwärmebedarfs – Dämmung opaker Hüllflächen

Für jede separat betrachtete Fläche der Gebäudehülle ist für jede Fenstervariante ein Dämmprozess zu definieren, der den Effekt der Bauteildämmung in Verbindung mit der Fenstervariante widerspiegelt. Ungewollte Maßnahmenkombinationen, wie bspw. die Dämmung der Außenwand ohne Austausch der Bestandsfenster, können durch Unterlassen der entsprechenden Prozessdefinition von vornherein ausgeschlossen werden. Jedem Dämmprozess wird ein spezifisches Heizwärme-Reduktionsprofil zugewiesen, dessen Werte  $lp^{clad}$  auf eine U-Wert-Verringerung von  $1 \text{ W/m}^2\text{K}$  des dazugehörigen Bauteils normiert sind.

Die Aktivitäten der Dämmprozesse bestimmen sich aus der Nebenbedingung 5.9 und werden durch Nebenbedingung 5.1 <sup>S.125</sup> auf die Knotenabflüsse übertragen. Die Bauteilinteraktionen werden durch Korrekturwerte  $lpadj^{clad}$  berücksichtigt. Diese Werte sind auf eine U-Wert-Reduktion von  $1 \text{ W/m}^2\text{K}$  des interagierenden Bauteils normiert und passen so den Bauteileinzeleffekt auf die Heizwärmereduktion im Falle der Maßnahmenkombination an. Die Bestimmung der Reduktionsprofilwerte  $lp^{clad}$  und der Korrekturprofilwerte  $lpadj^{clad}$  wird anhand der Modellanwendungsfälle im Abschnitt 6.2.3 <sup>S.171</sup> erläutert.

$$\begin{aligned}
 PA_{p,ty,ts} = & lp_{p,ty,ts}^{clad} \cdot \sum_{\substack{u \in U: \\ \exists (u,p) \in UP_{u,p}}} CAP_{u,ty} \\
 & - \sum_{\substack{u' \in U: \\ u' \neq u}} \left( lpadj_{p,u',ty,ts}^{clad} \cdot CAP_{u',ty} \right) - dPA_{p,ty,ts}^a + dPA_{p,ty,ts}^b \\
 & \forall p \in P : \exists (n,p) \in NP_{n,p} : n \in N^{clad}; \forall ty \in TY; \forall ts \in TS
 \end{aligned} \tag{5.9}$$

Die Hilfsvariablen  $dPA^a$  und  $dPA^b$  dienen lediglich zur Sicherstellung der Lösbarkeit für einzelne Systemzustände. Sie unterliegen zusätzlichen Restriktionen, die an dieser Stelle nicht dargestellt sind. Gleiches gilt für weitere Nebenbedingungen, die den Vorrang der Bedarfsreduktion einer permanent wirkenden Dämmmaßnahme vor der Bedarfsdeckung aus wärmebereitstellenden Anlagen mit unterbrechbarem Betrieb gewährleisten. Diese Restriktionen sind optional und nur dann erforderlich, falls die Wirkung einer installierten Dämmung in einzelnen Zeitscheiben vernachlässigt wird. Eine solche unzulässige Situation kann unter Umständen beim Einbezug von KWK-Anlagen als Systemgestaltungsoption entstehen.

### 5.5.5 Lüftung und Heizwärmerückgewinnung

Die Wärmeverluste, die sich aus dem erforderlichen Luftwechsel ergeben, sind bei der Vorgabe des Heizwärmebedarfs mit berücksichtigt. Werden Systemgestaltungsoptionen zur Wärmerückgewinnung in Erwägung gezogen, wird ihre Wirkungsweise durch Prozesse abgebildet, deren Output – ähnlich wie die Dämmmaßnahmen – den von der gewählten Fenstervariante abhängigen Heizwärmebedarf teilweise decken. Auch sie reduzieren damit die durch die Versorgungsanlagen bereitzustellende Wärme. Die Modellierung erfolgt deshalb auch in Form einer zusätzlichen (fiktiven) „Dämmmaßnahme“, wobei das fix vorgegebene Energiebereitstellungsprofil  $lp^{clad}$  den Wärmerückgewinnungseffekt widerspiegelt. Die Bestimmung der Zustandsausprägung dieser Systemoptionen beschränkt sich allerdings nur auf die Betrachtung, ob eine solche Anlage installiert ist oder nicht.

### 5.5.6 Hilfsenergiebedarf

Obwohl der Hilfsenergiebedarf zum Betrieb des Versorgungssystems im Vergleich zum privaten elektrischen Energiebedarf der Nutzer eher von untergeordneter Bedeutung ist, darf er bei der Analyse nicht vernachlässigt werden. Zum einen geht er in die energetische Bilanzierung des Gebäudes ein und wirkt sich damit auf den Zugang zu staatlichen Fördermitteln aus. Zum anderen ist er für den wirtschaftlichen Vergleich einzelner Systemgestaltungsoptionen relevant – auch im Zusammenhang mit der Nutzung von objektintern erzeugter elektrischer Energie.

Zur Erfassung des Hilfsenergiebedarfs einer Anlage ist für sie ein Hilfsenergieprozess  $p \in P^{aux}$  zu definieren, der lediglich einen Prozessinput für die benötigte Hilfsenergie aufweist. Das Aktivitätsniveau der Hilfsenergieprozesse wird durch Gleichung 5.10 festgelegt und kann bestimmt werden:

- aus der Leistungsaufnahme  $aux^{pow}$  der Betriebsnabeneinrichtungen der Anlage,
- aus einem fix vorgegebenen Hilfsenergiebedarf  $aux^{giv}$ , welcher entsteht, falls die Systemoption installiert ist,
- als prozentualer Anteil  $aux^{per}$  an dem Energieoutput der Anlagenhauptprozesse oder
- als entscheidungsunabhängiger sonstiger Hilfsenergie- bzw. allgemeiner Strombedarf  $aux^{misc}$ , welcher exogen vorgegeben in der energetischen Gebäudebilanz bzw. für den Stromanlagenbetrieb zu berücksichtigen ist.

$$\begin{aligned}
PA_{p,ty,ts} = & \quad aux_{p,ty,ts}^{pow} \cdot dr_{ts}^{tsa} \cdot \sum_{\substack{u \in U: \\ \exists (u,p) \in UP_{u,p}}} bUA_{u,ty,ts} \\
& + aux_{p,ty,ts}^{giv} \cdot \sum_{\substack{u \in U: \\ \exists (u,p) \in UP_{u,p}}} bCAP_{u,ty} \\
& + aux_{p,ty,ts}^{per} \cdot \sum_{\substack{u \in U: \\ \exists (u,p) \in UP_{u,p}}} \sum_{\substack{p' \in P \setminus P^{aux}: \\ \exists (u,p') \in UP_{u,p}}} PA_{p,ty,ts} \\
& + aux_{p,ty,ts}^{misc}
\end{aligned} \tag{5.10}$$

$\forall p \in P^{aux}; \forall ty \in TY; \forall ts \in TS$

Eine zusätzliche Nebenbedingung stellt für die binäre Anlagenaktivitätsvariable  $bUA$  sicher, dass sie den Wert eins annimmt, sofern mindestens ein Anlagenhauptprozess in der entsprechenden Zeitscheibe aktiv ist. Gleiches gilt für die Binärvariable  $bCAP$  sofern die Anlage zu einem Umsetzungszeitpunkt eine Zustandsausprägung größer null aufweist. In der Regel ist der Hilfsenergiebedarf für Systemgestaltungsoptionen mithilfe des zweiten oder dritten Terms der rechten Gleichungsseite hinreichend genau modellierbar. Die Erfassung über die Leistungsaufnahme der Betriebsneben-einrichtungen erlaubt zwar die größte Realitätsnähe, bedingt aber aufgrund der Vielzahl ganzzahliger Entscheidungsvariablen einen sehr hohen Komplexitätsgrad für die Optimierungsaufgabe.

### 5.5.7 Systementwicklung

Die Systementwicklung ergibt sich durch die Verknüpfung der Entscheidungsgrößen zur Zustands- und Änderungsausprägung der Systemoptionen. Bevor die Restriktionen zur Erfassung der Systementwicklung formuliert werden können, ist zunächst das Verständnis einer Systemoption und ihrer Ausprägungen im Kontext der Abbildungsmethodik nochmals genauer zu beleuchten (siehe auch Abschnitt 4.5.1 <sup>S. 85</sup>).

Eine modellierte Systemoption kann entweder mehrere identische Apparaturen (Typ A) oder eine modular aufgebaute Einzelanlage darstellen (Typ B). Bei einer Typ A-Systemoption repräsentiert die Zustandsausprägung die Summe mehrerer autonomer Einzelobjekte in Form einer abstrakten (virtuellen) Gesamtanlage. Änderungsausprägungen sind damit stets als Zu- bzw. Rückbau voneinander unabhängiger

Einheiten innerhalb dieser Technologiekategorie zu interpretieren, die aufgrund der aggregierten Abbildung eine einheitliche Betriebsweise aufweisen. Diese Perspektive eignet sich für technische Einrichtungen, die in größerer Anzahl und homogener Ausprägung im Gebäude vorkommen, wie bspw. dezentrale Durchlauferhitzer, die den Warmwasserzapfstellen einer Zone vorgeschaltet sind. Da der Warmwasserbedarf für diesen Gebäudebereich aggregiert und nicht separat für die einzelnen Zapfstellen vorgegeben wird, ist eine Einzelabbildung dieser Anlagen unnötig.

Die Typ B-Systemoptionen stellen dagegen Anlagen dar, deren Zustandsausprägung durch den Zubau oder Rückbau von Teilkomponenten (Segmenten, Modulen, Aggregaten etc.) zu einem Umsetzungszeitpunkt erhöht oder verringert werden kann. Diese Vorgehensweise ist bspw. für Solaranlagen systeme zweckmäßig, deren maximale Leistungsabgabe abhängig von der modular zusammengesetzten Kollektorfläche ist.

Für Typ A- und Typ B-Systemoptionen ist charakteristisch, dass zu einem Umsetzungszeitpunkt eine Änderungsausprägung weitgehend unabhängig von der bestehenden Zustandsausprägung der Vorperiode möglich ist.<sup>124</sup> Für eine realitätsnahe Modellierung der Entscheidungssituation ist deshalb noch ein Typ C zu definieren, welcher nicht modular aufgebaute Einzelanlagen repräsentiert. Für diesen Typ ist signifikant, dass bei der Erstinstallation die Zustandsausprägung der Systemoptionen frei bestimmt werden kann, diese aber zu einem späteren Zeitpunkt nicht mehr in Teilen erweiterbar oder rückbaubar ist. Das trifft bspw. auf eine Außenwanddämmung oder den Erzeuger einer zentralen Wärmeversorgungsanlage zu.

Die Bestimmung der Zustandsausprägung  $CAP$  in Abhängigkeit der Änderungsausprägungen  $CAP^{ext}$  (Zubau) und  $CAP^{dis}$  (Rückbau) basiert für alle Typen von Systemoptionen auf Nebenbedingung 5.11.  $CAP^{ext}$  ist als semi-kontinuierliche Variable definiert. Dadurch können technologie- bzw. marktbedingte oder gesetzlich geforderte Mindestausprägungen im Zubaufall berücksichtigt werden. Gleichzeitig ist es möglich, den Erweiterungsbereich einer Systemoption in einzelne, sich nicht überlappende Teilabschnitte  $cr$  zu untergliedern, die zur detaillierten Vorgabe der erforderlichen Anfangsauszahlungen für verschiedene Zubaugrößen genutzt werden können (siehe Abschnitt 5.6.2 S. 146). Der Parameter  $cap^0$  drückt die vorhandene Zustandsausprägung einer Systemoption am Anfang des Analysezeitraums vor dem ersten Umsetzungszeitpunkt aus.

---

<sup>124</sup> Eine Abhängigkeit besteht nur dahin gehend, dass die Rückbau-Änderungsausprägung maximal so groß sein kann, wie die Zustandsausprägung der Vorperiode.

$$CAP_{u,ty^1} = cap_{u,ty^1}^0 + \sum_{cr \in CR} (CAP_{u,cr,ty^1}^{ext}) - CAP_{u,ty^1}^{dis} \quad (5.11)$$

$$CAP_{u,ty} = CAP_{u,ty-1} + \sum_{cr \in CR} (CAP_{u,cr,ty}^{ext}) - CAP_{u,ty}^{dis}$$

$$\forall u \in U; \forall ty \in TY : ty > ty^1$$

Mit Nebenbedingung 5.12 wird der teilweise bzw. vollständige Rückbau der Zustandsausprägung einer Systemoption erzwungen, sofern die technische Nutzungsdauer einzelner Module bzw. der Gesamtanlage im betrachteten Umsetzungspunkt erreicht ist. Da aber auch ein vorzeitiger Rückbau bzw. Austausch der technischen Einrichtungen eine mögliche Modellentscheidung sein soll, ist die Nebenbedingung in Form einer Ausprägungsbilanz über den Zeitraum vom Startjahr bis zum jeweils betrachteten Umsetzungszeitpunkt formuliert. Der zu erzwingende Rückbau ergibt sich aus der Summe des erforderlichen Rückbaus aufgrund überschrittener Nutzungsdauern bis zum betrachteten Umsetzungszeitpunkt abzüglich des bereits realisierten Rückbaus zu früheren Umsetzungszeitpunkten.

$$CAP_{u,ty}^{dis} \geq \sum_{\substack{ty'' \in TY: \\ dr_{ty'',ty}^{ss} \geq ltp_{u,ty''}}} \left( \sum_{cr \in CR} CAP_{u,cr,ty''}^{ext} \right) - \sum_{ty''=ty^1}^{ty-1} CAP_{u,ty''}^{dis} \quad (5.12)$$

$$CAP_{u,ty'}^{dis} \geq \sum_{\substack{ty'' \in TY: \\ dr_{ty'',ty}^{ss} \geq ltp_{u,ty''}}} \left( \sum_{cr \in CR} CAP_{u,cr,ty''}^{ext} \right) - \sum_{ty''=ty^1}^{ty'-1} (CAP_{u,ty''}^{dis}) + cap_{u,ty^1}^0$$

$$\forall u \in U; \forall ty \in TY : ty < ty'; \forall ty' \in TY : dr_{ty^1,ty'}^{ss} \geq ltp_{u,ty^1}^0$$

Für Typ C-Systemoptionen werden zusätzlich die Nebenbedingungen 5.13 und 5.14 definiert. Sie gewährleisten, dass im Falle einer Ausprägungsänderung zunächst die vorhandene Zustandsausprägung vollständig zurückzubauen ist. Eine Zustandsänderung stellt damit stets eine Neuinstallation mit  $CAP^{ext} = CAP$  dar.

$$CAP_{u,ty}^{dis} \geq CAP_{u,ty-1} - big \cdot (1 - bCAP_{u,ty}^{dis}) \quad (5.13)$$

$$CAP_{u,ty^1}^{dis} \geq cap_{u,ty^1}^0 - big \cdot (1 - bCAP_{u,ty^1}^{dis})$$

$$\forall u \in U; \forall ty \in TY : ty > ty^1; big > \max (CAP_{u,ty}, cap_{u,ty^1}^0)$$

$$bCAP_{u,ty}^{dis} \geq \frac{1}{big} \cdot \left( CAP_{u,ty}^{dis} + \sum_{cr \in CR} CAP_{u,cr,ty}^{ext} \right) \quad (5.14)$$

$$\forall u \in U; \forall ty \in TY; big > CAP_{u,ty}^{dis} + \sum_{cr \in CR} CAP_{u,cr,ty}^{ext}$$

Weitere Restriktionen mit Einfluss auf die Systementwicklung sollen im Folgenden nur genannt werden. Hierbei handelt es sich um Nebenbedingungen, die den ganzzahligen (diskreten) Zu- und Rückbau erzwingen oder Flächen- und Raumbeschränkungen bei der Entscheidung zur Zustandsausprägung berücksichtigen können. Letztere sind bspw. hinsichtlich der begrenzten Dachfläche zum Einsatz von Solarthermie und PV-Anlagen oder der räumlichen Beschränkungen beim Aufstellen von Versorgungsanlagen im Hausanschlussraum relevant.

Weiterhin sind Nebenbedingungen implementiert, die unmögliche Kombinationen vorgegebener Systemoptionen verhindern, wie bspw. den gleichzeitigen Einsatz zweier Fenstervarianten für ein und dieselbe Maueröffnung. Ergänzt werden diese Restriktionen durch eine Reihe von Variablenschranken, mit denen eine Zustands- oder Änderungsausprägung zu einem Umsetzungszeitpunkt erzwungen und/oder eingegrenzt werden kann. Diese Analyseoptionen können u. a. zur Abbildung von Prämissen bzw. nicht monetären Zielen des Gebäudeeigentümers (bspw. zum Einsatz bestimmter Technologien) genutzt werden.

## 5.6 Modellierung der ökonomischen Entscheidungsaspekte

Mit diesem Unterkapitel erfolgt die Überleitung zur Modellierung der ökonomischen Aspekte der Entscheidungssituation. Zentrales Element zur Bestimmung der ökonomischen Konsequenzen aus der Systemgestaltung sind die Finanzplankonten, über die alle Ein- und Auszahlungen erfasst werden. Im ersten Abschnitt ist zunächst die Struktur der Konten dargelegt, bevor in den daran anschließenden Abschnitten die Vorgehensweise zur Bestimmung der einzelnen Zahlungsgrößen vorgestellt wird.

### 5.6.1 Finanzplankonten

Für jeden betrachteten Eigentümer wird ein separates Finanzplankonto erstellt (siehe Nebenbedingung 5.15). Die linke Gleichungsseite verdeutlicht die grundlegende Forderung der vollständigen Finanzplanung. Diese besteht darin, dass für jedes Modelljahr ein Ausgleich zwischen den auf der rechten Gleichungsseite angeführten Ein- und Auszahlungen erreicht werden muss. Ist das der Fall, ist die Solvenz des Eigentümers im Rahmen der betrachteten Entscheidungssituation sichergestellt. Für die nachfolgend beschriebenen Zahlungsvorgänge wird vereinfachend angenommen, dass sie als kumulierter Jahreswert am Beginn bzw. Ende eines Modelljahres anfallen. Der jeweilige Bezugszeitpunkt ist in Nebenbedingung 5.15 angegeben.

Der erste Term der rechten Gleichungsseite repräsentiert die Entscheidung des Eigentümers zur Verwendung des liquiden Mittelbestandes  $EQU^s$  vom Ende des Vorjahres. Diese Mittel können am Anfang des aktuellen Jahres zur Finanzierung  $EQU^m$  von Modernisierungsmaßnahmen oder für die langfristige Kapitalanlage  $EQU^l$  eingesetzt werden. Hierfür nicht genutzte Mittel werden in der kurzfristigen Kapitalanlage gebunden und stehen am Ende des aktuellen Jahres zuzüglich der erreichten Verzinsung und abzüglich der Kapitalertragssteuer wieder zur Verfügung. Für die langfristige Kapitalanlage gilt die Festlegung, dass die dafür eingesetzten Mittel jeweils bis zum Analysehorizont gebunden bleiben. Der zweite Term berücksichtigt die jährlichen Rückflüsse aus der Verzinsung sowie die Rückzahlung des Kapitals am Ende des Analysezeitraums. Der Mitteleinsatz  $EQU^m$  für Modernisierungsinvestitionen wird im Abschnitt 5.6.2 <sup>S. 146</sup> näher beleuchtet.

Term drei erfasst die monetären Konsequenzen aus der Entscheidung zur Fremdkapitalnutzung. Er beinhaltet zunächst die Tilgung der am Vorjahresende aufgenommenen Fremdmittel  $DBT^s$  zur kurzfristigen Ergänzungsfinanzierung. Diese sind annahmegemäß nach einjähriger Laufzeit und mit entsprechender Verzinsung vollständig zurückzuzahlen.

$$0 = \quad (5.15)$$

Verwendung der liquiden Mittel (Jahresanfang)

$$\left( EQU_{i,y-1}^s - EQU_{i,y}^l - \sum_{\substack{ty \in TY: \\ ty=y}} \sum_{u \in U} EQU_{i,u,ty}^m \right) \cdot (1 + ir_{i,y}^{es} \cdot (1 - tax_{i,y}^{cg}))$$

Langfristige Kapitalerträge (Jahresende)

$$+ \sum_{\substack{y' \in Y: \\ y' \geq y}} \left( EQU_{i,y'}^l \cdot ir_{i,y'}^{el} \cdot (1 - tax_{i,y'}^{cg}) \right) + \sum_{\substack{y'' \in Y: \\ dr_{y'',y}^{se} = dr_{y'',y}^{se}}} EQU_{i,y''}^l$$

Kapitaldienste (Jahresende)

$$- DBT_{i,y-1}^s \cdot (1 + ir_{i,y}^{ds}) - \sum_{u \in U} \sum_{\substack{ty \in TY: \\ ty \leq y}} \sum_{d \in D} \left( DBT_{i,u,d,ty,y}^{in} + DBT_{i,u,d,ty,y}^{srp} - DBT_{i,u,d,ty,y}^{rm} \cdot ir_{d,ty,y}^{dl} \cdot tax_{i,y}^{inc} \right)$$

Auszahlungen für Selbstnutzung des Gebäudes und ggf. zulässige Steuergutschrift (Jahresende)

$$- \sum_{\substack{z \in Z^0: \\ \exists (i,z) \in IZ_{i,z}}} CST_{z,y}^z + \sum_{u \in U} \sum_{\substack{ty \in TY: \\ ty \leq y}} (DPR_{u,z,ty,y}^z \cdot tax_{i,y}^{inc})$$

Ein- und Auszahlungen aus Anlagenbewirtschaftung (Jahresende)

$$+ (1 - tax_{i,y}^{inc}) \cdot \left( INC_{i,y}^{opr} - CST_{i,y}^{opr} - \sum_{u \in U} \sum_{\substack{ty \in TY: \\ ty \leq y}} DPR_{u,i,ty,y}^{opr} \right)$$

Ein- und Auszahlungen aus Gebäudebewirtschaftung (Jahresende)

$$+ (1 - tax_{i,y}^{inc}) \cdot \left( \sum_{\substack{z \in Z^t: \\ \exists (i,z) \in IZ_{i,z}}} (INC_{z,y}^{rnt} \cdot (1 - cf_{z,y}^{adm}) - CST_{z,y}^{zna} - CST_{z,y}^{vt}) - \sum_{u \in U} \sum_{\substack{ty \in TY: \\ ty \leq y}} DPR_{u,z,ty,y}^z \right)$$

Mitteleinlage und -entnahme, kurzfristige Ergänzungsfinanzierung und liquide Mittel (Jahresende)

$$+ equ_{i,y}^{in} - EQU_{i,y}^{dis} + DBT_{i,y}^s - EQU_{i,y}^s$$

$$\forall i \in I; \forall y \in Y$$

Werden zur Maßnahmenfinanzierung langfristige Darlehen in Anspruch genommen, repräsentiert  $DBT^{in}$  im dritten Term die aufzubringende jährliche Ratenzahlung – bestehend aus Zins und Tilgung. Eine zulässige Steuergutschrift für die Zinszahlungen wird aus dem Restschuldbetrag  $DBT^{rm}$  zum Jahresanfang ermittelt. Sofern die Möglichkeit besteht, können auch Sondertilgungen  $DBT^{srp}$  getätigt werden. Die Abbildung von Fremdkapitalvarianten und die Entscheidung zur Inanspruchnahme sind Inhalte des Abschnitts 5.6.2 <sup>S. 146</sup>. Die Kapitaldienstermittlung wird im Abschnitt 5.6.3 <sup>S. 150</sup> vertieft.

Die Auszahlungen des Gebäudeeigennutzers für die Instandhaltung und den Betrieb der Versorgungsanlagen sind mit  $CST^z$  im vierten Term berücksichtigt. Die Bestimmung wird im Abschnitt 5.6.4 <sup>S. 153</sup> beschrieben. Um den Anwendungsbereich für theoretische Analysen zu erweitern, ist auch eine Steuergutschrift in Abhängigkeit der zulässigen Abschreibungsbeträge  $DPR^z$  als optionale Zahlungsgröße für die Eigentümer vorgesehen. Der fünfte Term adressiert die Bewirtschaftung von KWK- und PV-Anlagen. Die Einzahlungen aus Energielieferungen drückt die Variable  $INC^{opr}$  aus. Die Auszahlungen für den Energiebezug und den Anlagenbetrieb sowie die steuerlichen Abschreibungsbeträge werden durch die Modellgrößen  $CST^{opr}$  und  $DPR^{opr}$  beschrieben. Auf die Modellierung der KWK- und PV-Anlagenbewirtschaftung wird im Abschnitt 5.6.5 <sup>S. 154</sup> eingegangen.

Handelt es sich bei dem Eigentümer um einen Vermieter, werden die Zahlungsgrößen für die Gebäudebewirtschaftung durch den sechsten Term erfasst. Sein zu versteuerndes Einkommen ergibt sich als Saldo der Mieteinzahlungen  $INC^{rnt}$ , der nicht umlagefähigen Auszahlungen  $CST^{zna}$  für Instandhaltung und Anlagenbetrieb, der zusätzlichen Auszahlungen  $CST^{vt}$  während der Leerstandzeit bei einem Mieterwechsel sowie der steuerlich wirksamen Abschreibungen  $DPR^z$ . Auszahlungen an Dritte für die Gebäudeverwaltung können als Anteil  $cf^{adm}$  an den Mieteinzahlungen in die Analyse einbezogen werden. Die Bestimmung der Zahlungsgrößen wird im Abschnitt 5.6.6 <sup>S. 156</sup> für die Mieten und im Abschnitt 5.6.7 <sup>S. 160</sup> für die Abschreibungsbeträge eingehender erörtert.

Der letzte Term der rechten Gleichungsseite dient schließlich zum Erreichen eines ausgeglichenen Finanzierungssaldos. Hierfür werden zunächst noch die Eigenmitteleinlagen  $equ^{in}$  bzw. die Entnahmen  $EQU^{dis}$  des Eigentümers erfasst. Ergibt sich aus den bisher betrachteten Zahlungsgrößen ein Einzahlungsüberschuss, steht dieser dem Eigentümer als liquider Eigenmittelbestand am Jahresende zur Verfügung. Im Fall eines Einzahlungsdefizits ist der Fehlbetrag durch die kurzfristige Ergänzungsfinanzierung  $DBT^s$  auszugleichen. Die Inanspruchnahme der kurzfristigen Ergänzungsfinanzierung ist allerdings nicht nur auf die Jahresfehlbeträge beschränkt, sondern kann generell zur Erhöhung der liquiden Mittel  $EQU^s$  am Jahresende genutzt werden.

## 5.6.2 Anfangsauszahlungen und Finanzierungsstruktur

Die Bestimmung der anfänglichen Maßnahmenfinanzierung wird getrennt von den Finanzplankonten der Gebäudeeigentümer betrachtet. Durch die Trennung wird vermieden, dass die zweckgebundenen langfristigen Fremdmittel zur kurzfristigen Ergänzungsfinanzierung oder für eine Mittelentnahme durch den Eigentümer herangezogen werden. Gleichzeitig ist es möglich, die Nutzung einzelner Fremdfinanzierungsvarianten nur für bestimmte Systemoptionen zuzulassen, um bspw. technologie-spezifische Förderprogramme betrachten zu können. Bevor die Finanzierungsentscheidung beleuchtet wird, ist zunächst auf die Bestimmung der Anfangsauszahlungen für die Maßnahmenumsetzung einzugehen.

Die Anfangsauszahlungen zur Maßnahmenumsetzung können für jede Systemoption aus einem fixen (vom Ausmaß der Änderungsausprägung unabhängigen) und einem variablen (vom Ausmaß der Änderungsausprägung abhängigen) Bestandteil ermittelt werden (siehe Gleichung 5.16). Der Parameter  $inv^{fix}$  beinhaltet die Basisauszahlung, die grundsätzlich im Falle einer Maßnahmenumsetzung erforderlich ist, wie bspw. die Einrüstung des Gebäudes für Arbeiten an der Außenwand. Der zweite Bestandteil ergibt sich aus dem Maßnahmenumfang, indem die Änderungsausprägung der Systemoption mit dem Auszahlungsfaktor  $inv^{cap}$  multipliziert wird.<sup>125</sup>

$$INV_{u,ty} = \sum_{cr \in CR} (inv_{u,cr,ty}^{fix} \cdot bCAP_{u,cr,ty}^{ext} + inv_{u,cr,ty}^{cap} \cdot CAP_{u,cr,ty}^{ext}) \quad (5.16)$$

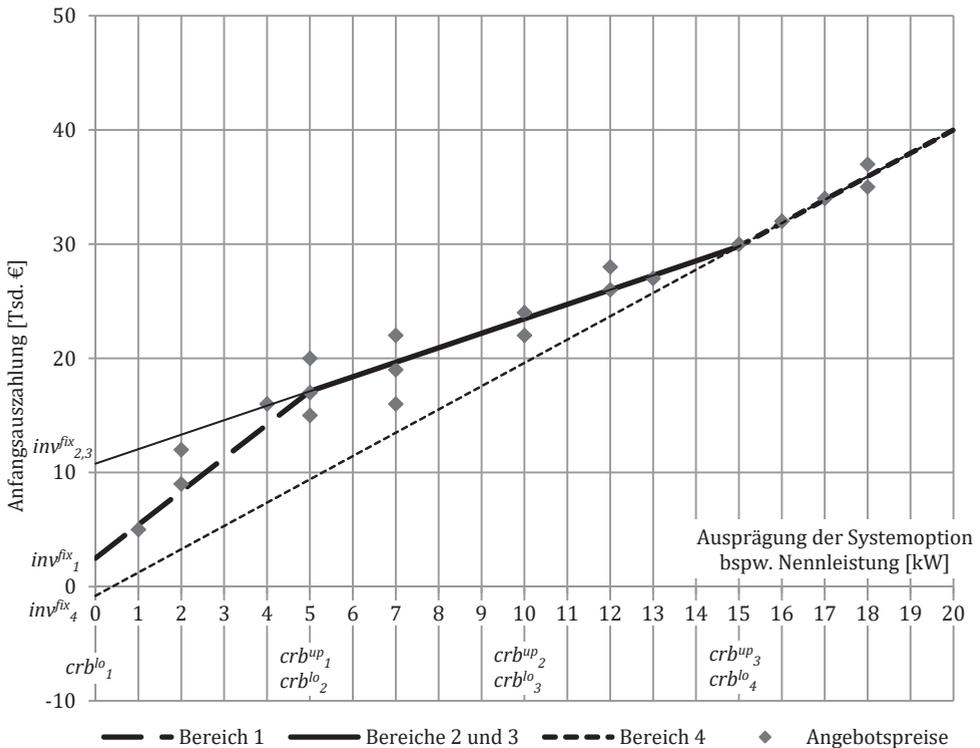
$$INV_{u',ty} = \sum_{cr \in CR} (inv_{u',cr,ty}^{fix} \cdot bCAP_{u',cr,ty}^{ext} + inv_{u',cr,ty}^{cap} \cdot CAP_{u',cr,ty}^{ext} \cdot ar_{u',ty}^c)$$

$$\forall u' \in U : \exists (n, u') \in NU_{n,u'} : n \in N^{clad}; \forall u \in U : u \neq u'; \forall ty \in TY$$

Für eine Reihe von Systemoptionen wird sich der variable Auszahlungsanteil nicht proportional zum Umfang der Änderungsausprägung verhalten. Für die Betrachtung größerer Ausprägungsbereiche kann es deshalb erforderlich sein, den Faktor  $inv^{cap}$  als einen von der Ausprägungsänderung abhängigen Parameter vorzugeben. Hierfür wird der mögliche Ausprägungsbereich in Teilbereiche  $cr \in CR$  gegliedert (siehe Abbildung 16). Für jedes  $cr$  kann eine lineare Approximation der erforderlichen

<sup>125</sup> Der Begriff „Änderungsausprägung“ bezieht sich hier nur auf den Zubau von Systemgestaltungsoptionen. Auszahlungen für deren Rückbau werden nicht separat betrachtet. Sie können indirekt bei  $inv^{fix}$  der Ersatzanlage oder über die im Abschnitt 5.6.4<sup>S. 153</sup> beschriebenen Parameter am Ende der Nutzungsdauer erfasst werden.

Anfangsauszahlungen aus realen Angebotspreisen innerhalb des Teilbereiches vorgenommen werden. Die Teilbereichsgrenzen bilden die Schranken  $crb^{lo}$  und  $crb^{up}$ , welche für die semi-kontinuierliche Zubauvariable  $CAP^{ext}$  die jeweiligen Zulässigkeitsbereiche definieren. Der Parameter  $inv^{cap}$  repräsentiert den Anstieg der linearen Teilbereichsfunktionen. Die Ordinatenschnittpunkte der Teilbereichsfunktionen entsprechen  $inv^{fix}$ .



**Abbildung 16:** Schrittweise lineare Approximation der erforderlichen Anfangsauszahlungen

Die Änderungen an der Systemstruktur sollen jeweils am Anfang eines dafür vorgesehenen Modelljahres  $ty$  erfolgen. Die Bestimmung der anfänglichen Maßnahmenfinanzierung übernimmt Nebenbedingung 5.17. Sie fordert, dass jeder Eigentümer den auf ihn entfallenen Anteil der Anfangsauszahlungen  $INV$  vollständig durch Eigenmittel und/oder Fremdkapital zu decken hat. Das Eigenmittelbudget am Ende eines Modelljahres – gegebenenfalls ergänzt um eine kurzfristige Ergänzungsfinanzierung – wurde im vorangegangenen Abschnitt erörtert. Aus diesem liquiden Mittelbestand können die Anfangsauszahlungen  $EQU^m$  am Beginn des Folgejahres bestritten werden.

$$INV_{u,ty} \cdot \left( opr_{i,u} + \sum_{\substack{z \in Z: \\ \exists (i,z) \in IZ_{i,z}}} ctr_{z,u} \right) = \quad (5.17)$$

$$EQU_{i,u,ty}^m + \sum_{d \in (D^a \cup D^r)} \left( \frac{DBT_{i,u,d,ty,y}^{rm}}{1 - dbt_{d,ty}^g} \right) + \sum_{d \in D^g} DBT_{i,u,d,ty,y}^{rm}$$

$$\forall i \in I; \forall u \in U; \forall ty \in TY; \forall y \in Y : y = ty$$

Die Entscheidung für zusätzliche bzw. alternative Finanzierungsmöglichkeiten wird durch den zweiten und den dritten Summanden der rechten Gleichungsseite abgebildet. Hierbei handelt es sich um langfristige Darlehen und Zuschüsse, die in gängigen Standardvarianten berücksichtigt werden können. Die Vorgabe erfolgt differenziert nach den drei Grundformen:

- Annuitätendarlehen  $D^a$ ,
- Tilgungsdarlehen (konstante Tilgungsrate)  $D^r$  und
- reine Investitionszuschüsse  $D^g$ .

Die Modellvariable  $DBT^{rm}$  drückt den Restschuldbetrag einer am Anfang von  $ty$  in Anspruch genommenen Fremdfinanzierungsvariante zu Beginn des Jahres  $y$  aus. Mit der Geltungsbeschränkung  $y = ty$  für Nebenbedingung 5.17 werden durch den zweiten Summanden der rechten Gleichungsseite also die anfänglichen Darlehensbeträge erfasst. Der Parameter  $dbt^g$  dient zur Vorgabe eines Investitionszuschusses in Abhängigkeit des Darlehensbetrags.

Der dritte Summand repräsentiert dagegen reine Zuschüsse. Da sich hieraus keine Kapitaldienste ergeben, stellt  $DBT^{rm}$  für diesen Finanzierungstyp nur die Zuschusshöhe zu einem Umsetzungszeitpunkt dar und wird für die Folgejahre nicht als Restschuldbetrag betrachtet. Die Berücksichtigung eines solchen Zuschusses als Modellentscheidung ist nur sinnvoll, falls die Bewilligung von Bedingungen abhängig ist, die Teil der Modellentscheidung sind. In diesem Fall kann der Förderbetrag nicht direkt bei der Vorgabe von  $inv^{fix}$  und  $inv^{cap}$  für die Anfangsauszahlung beachtet werden.<sup>126</sup>

<sup>126</sup> Das trifft bspw. auf das KfW-Förderprogramm 430 zu, bei dem die Zuschussquote und der maximale Förderbetrag vom erreichten energetischen Gebäudestandard abhängig sind.

Für Investitionszuschüsse und langfristige Darlehen können folgende Merkmale spezifiziert werden:

- Maximalbetrag und/oder zulässiger Anteil an der gesamten Maßnahmenfinanzierung,
- Laufzeit, Zinsen und Zinsbindungsdauern (Darlehen),
- tilgungsfreie Anfangsjahre und Tilgungszuschüsse (Darlehen),
- Zulässigkeit von Sondertilgungen (Darlehen),
- Bewilligungsanforderungen (KfW-Effizienzhaus-Standards) und
- Zulässigkeit der Kombination mit anderen Fremdfinanzierungen.

Auf die Darstellung der einzelnen Restriktionen zur Begrenzung der Fremdmittelbeträge und zum Ausschluss unzulässiger Finanzierungskombination wird an dieser Stelle verzichtet. Die Kapitaldienstermittlung aus den Verzinsungs- und Tilgungskonditionen ist Gegenstand des nächsten Abschnitts. Einzugehen ist noch auf die Berücksichtigung von energetischen Bewilligungsanforderungen für einzelne zinsverbilligte Darlehens- und Zuschussvarianten der KfW-Bankengruppe.

Ein zu erfüllendes Kriterium für die Inanspruchnahme dieser Fördermittel betrifft den Primärenergiebedarf des Gebäudes. Dieser wird als spezifische Größe aus der Aktivität  $FA^{yimp}$  bzw.  $FA^{yint}$  und dem jeweils zugewiesenen Primärenergiefaktor  $pef^{imp}$  bzw.  $pef^{int}$  der Flüsse sowie der anzurechnenden Nutzflächen  $ar_{z,ty}^u$  mit Nebenbedingung 5.18 bestimmt.

$$PE_{b,ty} = \frac{\sum_{\substack{n \in N: \\ \exists (b,n) \in BN_{b,n}}} \sum_{ec \in EC} \left( FA_{n,ec,ty}^{yimp} \cdot pef_{n,ec,ty}^{imp} + \sum_{\substack{n' \in N: \\ n \neq n'}} (FA_{n,n',ec,ty}^{yint} \cdot pef_{n,n',ec,ty}^{int}) \right)}{\sum_{\substack{z \in Z: \\ \exists (b,z) \in BZ_{b,z}}} ar_{z,ty}^u} \quad (5.18)$$

$$\forall b \in B; \forall ty \in TY$$

Durch das Zusammenspiel der Nebenbedingungen 5.19 und 5.20 wird die Nutzung eines Darlehens bzw. Zuschusses  $d$  unterbunden, falls der spezifische Gebäudeprimärenergiebedarf  $PE$  nach der Maßnahmenumsetzung über dem maximal zulässigen Wert  $pe^d$  zur Bewilligung der Finanzierungsmittel liegt.

$$bDBT_{b,d,ty}^{rm} \geq \frac{PE_{b,ty} - pe_{d,ty}^d}{big} \quad (5.19)$$

$$\forall b \in B; \forall d \in D; \forall ty \in TY, big > PE_{b,ty}$$

$$\sum_{i \in I} \sum_{\substack{u \in U: \\ \exists (b,u) \in BU_{b,u}}} DBT_{i,u,d,ty,y}^{rm} \leq big \cdot (1 - bDBT_{b,d,ty}^{rm}) \quad (5.20)$$

$$\forall b \in B; \forall d \in D; \forall ty \in TY, big > DBT_{i,u,d,ty,y}^{rm}$$

Die zweite gestellte Bewilligungsanforderung zur Beschränkung des Transmissionswärmeverlustes beeinflusst in gleicher Weise die Binärvariable  $bDBT^{rm}$ . Auf diese Nebenbedingung kann aber in der Regel verzichtet werden, da die geforderte Begrenzung des Primärenergiebedarfs kaum zu erreichen ist, ohne dass gleichzeitig auch die Anforderung zum Transmissionswärmeverlust erfüllt wird.

### 5.6.3 Kapitaldienste für langfristige Fremdfinanzierung

Für Annuitäten- und Tilgungsdarlehen wird die jährliche aufzubringende Ratenzahlung  $DBT^{in}$  – bestehend aus dem Tilgungs- und Zinsanteil – durch Nebenbedingung 5.21 errechnet. Der erste Zeitindex von  $DBT^{in}$  beschreibt wiederum den Zeitpunkt der Darlehensaufnahme (Anfang von  $ty$ ). Der zweite Zeitindex  $y$  bezeichnet das Modelljahr, an dessen Ende die Ratenzahlung anfällt. Für  $ty = y$  entspricht  $DBT^{in}$  damit der ersten Ratenzahlung im Jahr der Darlehensaufnahme.

Die Entwicklung der Darlehensverzinsung  $ir^{dl}$  kann jährlich variierend vorgegeben werden. Zusätzlich besteht die Möglichkeit, Zinsbindungen über mehrere Jahre der Darlehenslaufzeit  $dbt^{lt}$  zu definieren. Hierfür wird zwischen einer ersten Zinsbindungsperiode mit der Dauer  $dbt^{if1}$  und den folgenden Perioden – jeweils mit der Dauer  $dbt^{if2}$  – unterschieden. Innerhalb dieser Zeiträume gilt konstant der vorgegebene Zinssatz des ersten Jahres der jeweiligen Bindungsperiode.

$$DBT_{i,u,d,ty,y}^{in} = DBT_{i,u,d,ty,y}^{rm} \cdot ir_{d,ty,y}^{dl} \quad (5.21) \text{ (a)}$$

$$DBT_{i,u,d',ty,y'}^{in} = DBT_{i,u,d',ty,y'}^{rm} \cdot dbt_{d',ty,y'}^{in} \quad (b)$$

$$DBT_{i,u,d'',ty,y''}^{in} = DBT_{i,u,d'',ty,y''}^{rm} \cdot dbt_{d'',ty,y''}^{in} + DBT_{i,u,d'',ty,y''}^{rm} \cdot ir_{d'',ty,y''}^{dl} \quad (c)$$

$$DBT_{i,u,d',ty,y''}^{in} = DBT_{i,u,d',ty,y''}^{rm} - \left( (dr_{ty,y''}^{ss} - dbt_{d',ty}^{if1}) \text{ modulo } dbt_{d',ty}^{if2} \right) \cdot dbt_{d',ty,y''}^{in} \quad (d)$$

$$DBT_{i,u,d'',ty,y''}^{in} = DBT_{i,u,d'',ty,y''}^{rm} - \left( (dr_{ty,y''}^{ss} - dbt_{d'',ty}^{if1}) \text{ modulo } dbt_{d'',ty}^{if2} \right) \cdot dbt_{d'',ty,y''}^{in} \\ + DBT_{i,u,d'',ty,y''}^{rm} \cdot ir_{d'',ty,y''}^{dl} \quad (e)$$

$$\forall i \in I; \forall u \in U; \forall d \in (D^a \cup D^r); \forall d' \in D^a; \forall d'' \in D^r; \forall ty \in TY$$

$$\forall y \in Y : \quad 1 \leq dr_{ty,y}^{se} \leq dbt_{d,ty}^{gp};$$

$$\forall y' \in Y : \quad dbt_{d,ty}^{gp} < dr_{ty,y}^{se} \leq dbt_{d,ty}^{if1} : dbt_{d,ty}^{gp} < dbt_{d,ty}^{if1};$$

$$\forall y'' \in Y : \quad \max(dbt_{d,ty}^{if1}, dbt_{d,ty}^{gp}) < dr_{ty,y}^{se} \leq dbt_{d,ty}^{lt}$$

Für Annuitätendarlehen wird die jährliche Rate jeweils für eine Zinsbindungsdauer konstant gehalten. Für Tilgungsdarlehen gilt dies nur für den Tilgungsanteil der Rate. Sofern eine tilgungsfreie Anfangszeit  $dbt^{gp}$  vereinbart wird, entspricht die Rate in diesem Zeitraum für beide Darlehensformen lediglich den anfallenden Zinszahlungen (siehe Gleichung 5.21a). Für den Folgezeitraum bis zum Ablauf der ersten Zinsbindungsperiode errechnet sich die jährliche Ratenzahlung für Annuitätendarlehen aus dem anfänglichen Darlehensbetrag und dem Faktor  $dbt^{in}$  (siehe Gleichung 5.21b). Letzterer wird als Annuitätenfaktor nach Formel 5.22 in Abhängigkeit der Darlehenslaufzeit und der tilgungsfreien Anfangszeit berechnet.

$$dbt_{d,ty,y}^{in} = \frac{(1 + ir_{d,ty,ty}^{dl})^{(dbt_{d,ty}^{lt} - dbt_{d,ty}^{gp})} \cdot ir_{d,ty,ty}^{dl}}{(1 + ir_{d,ty,ty}^{dl})^{(dbt_{d,ty}^{lt} - dbt_{d,ty}^{gp})} - 1} \quad (5.22)$$

$$\forall d \in D^a; \forall ty \in TY; \forall y \in Y : y \geq ty : dbt_{d,ty}^{gp} < dr_{ty,y}^{se} \leq dbt_{d,ty}^{if1} : dbt_{d,ty}^{gp} < dbt_{d,ty}^{if1}$$

Für Tilgungskredite wird der jährliche Tilgungsbetrag für den ersten Zinsbindungszeitraum aus der anfänglichen Darlehenshöhe und dem Faktor  $dbt^{in}$  bestimmt, welcher sich unter Beachtung der tilgungsfreien Anfangsjahre nach Formel 5.23 errechnet. Die jährliche Ratenzahlung für diese Darlehensform ergibt sich aus dem Tilgungsbetrag ergänzt um den Zinsbetrag (siehe Gleichung 5.21c).

$$dbt_{d,ty,y}^{in} = \frac{1}{dbt_{d,ty}^{lt} - dbt_{d,ty}^{gp}} \quad (5.23)$$

$$\forall d \in D^r; \forall ty \in TY; \forall y \in Y : y \geq ty : dbt_{d,ty}^{gp} < dr_{ty,y}^{se} \leq dbt_{d,ty}^{if1} : dbt_{d,ty}^{gp} < dbt_{d,ty}^{if1}$$

Für die Zeiträume nach der ersten Zinsbindungsperiode erfolgt die Ermittlung der Ratenzahlungen äquivalent. Hierfür wird der jeweilige Restschuldbetrag zum Beginn der einzelnen Bindungsperioden mit  $dbt^{in}$  multipliziert, welcher in Abhängigkeit der Darlehensrestlaufzeit und des dann gültigen Zinssatzes berechnet wird. Für Tilgungsdarlehen sind wieder die Zinszahlungen separat zu berücksichtigen (siehe Gleichungen 5.21d und e).

Die Restschuld  $DBT^{rm}$  eines am Anfang von  $ty$  in Anspruch genommenen Darlehens zu Beginn eines Modelljahres  $y$  bestimmt sich aus der Restschuld zu Beginn des Vorjahres abzüglich des Tilgungsanteils der Ratenzahlung, eines eventuell gewährten Tilgungszuschusses  $DBT^{gr}$  und einer gegebenenfalls möglichen Sondertilgung  $DBT^{srp}$  am Ende des Vorjahres (siehe Nebenbeding 5.24).

$$\begin{aligned} DBT_{i,u,d,ty,y}^{rm} &= DBT_{i,u,d,ty,y-1}^{rm} \cdot (1 + ir_{d,ty,y-1}^{dl}) - DBT_{i,u,d,ty,y-1}^{in} \\ &\quad - DBT_{i,u,d,ty,y-1}^{gr} - DBT_{i,u,d,ty,y-1}^{srp} + dDBT_{i,u,d,ty,y-1}^{in} \\ &\quad \forall i \in I; \forall u \in U; \forall d \in (D^a \cup D^r); \forall ty \in TY; \forall y \in Y : y > ty \end{aligned} \quad (5.24)$$

Höhe und Zeitpunkt der Sondertilgungen durch den Investor sind in Abhängigkeit der Verfügbarkeit liquider Mittel Modellentscheidungen. Die zulässigen Zeiträume und der Umfang der Sondertilgungen können beschränkt werden. Die Hilfsvariable  $dDBT^{in}$  ist an weitere, hier nicht aufgeführte Nebenbedingungen gebunden. Sie verringert die geforderte Ratenzahlung in einem Modelljahr, falls diese die durch vorgelegte Sondertilgungen reduzierten Verbindlichkeiten übersteigen würde.

### 5.6.4 Auszahlungen für Instandhaltung und Anlagenbetrieb

Die Auszahlungen für die Instandhaltung und den Anlagenbetrieb umfassen die Kosten für den Energiebezug sowie die Kosten für die Inspektion, Wartung/Reinigung, Reparatur/Instandsetzung und sonstige Kosten (bspw. Versicherung etc.) der Anlagen bzw. Bauteile während ihrer Nutzungsdauer. Die spezifischen Energiebezugspreise werden mit dem Parameter  $cst^{imp}$  den Importflüssen und mit dem Parameter  $cst^{int}$  den internen Flüssen zugewiesen. Die sonstigen Betriebs- und die Instandhaltungsauszahlungen für eine Systemoption können durch die Parameter:

- $cst^{fix}$  als fixe Kosten,
- $cst^{cap}$  als von der Zustandsausprägung abhängige Kosten und
- $cst^{act}$  als einsatzabhängige Kosten vorgegeben werden.

Gleichung 5.25 ermittelt die Instandhaltungs- und Betriebsauszahlungen, welche den Eigennutzerzonen zuzurechnen sind. Die Energiebezugsmenge einer Systemoption wird anhand der Aktivität ihrer Prozesse erfasst. Die Energiekosten ergeben sich durch die Multiplikation der Prozessaktivitäten  $PA$  mit den Preisfaktoren  $cst^{imp}$  bzw.  $cst^{int}$  der Flüsse, welche den Prozessinput am dazugehörigen Knoten bereitstellen. Da  $PA$  die Energieabgabe der Prozesse repräsentiert, ist dabei noch der Prozesswirkungsgrad  $eff$  zu berücksichtigen.

(5.25)

$$CST_{z,y}^z = \sum_{\substack{ty \in TY: \\ \exists (y,ty) \\ \in YTY_{y,ty}}} \sum_{u \in U} \left( cst_{u,y}^{fix} \cdot bCAP_{u,ty} + cst_{u,y}^{cap} \cdot CAP_{u,ty} \right) + \sum_{\substack{p \in P: \\ \exists (u,p) \\ \in UP_{u,p}}} \left( cst_{p,y}^{act} \cdot PA_{p,ty}^y \right) + \sum_{\substack{ec \\ \in EC}} \left( \sum_{ts \in TS} \frac{if_{p,ec,ty} \cdot PA_{p,ty,ts}}{eff_{p,ty}} \right) \cdot \left( \sum_{\substack{n \in N: \\ \exists (n,u) \in NU_{n,u}}} cst_{n,ec,y,ts}^{imp} \right) + \left( \sum_{\substack{n \in N: \\ \exists (n,u) \\ \in NU_{n,u}}} \sum_{\substack{n' \in N: \\ n \neq n'}} cst_{n',n,ec,y,ts}^{int} \right) \cdot ctr_{z,u}$$

$\forall z \in (Z^0 \cup Z^t); \forall y \in Y$

Die Energiekosten werden zusammen mit den restlichen Kosten durch den Anteilfaktor  $ctr$  auf die angeschlossenen Zonen verteilt und bilden die Zahlungsgröße  $CST^z$  im Finanzplan eines Eigennutzers (siehe Abschnitt 5.6.1 <sup>S. 143</sup>).

Eine ähnliche Nebenbedingung wird zur Kostenerfassung für den Betrieb von KWK- bzw. PV-Anlagen formuliert. Dort übernimmt der Anteilfaktor  $opr$  die Verteilung der Kosten auf die einzelnen Anlagenbetreiber, welche als Zahlungsgröße  $CST^{opr}$  in ihrem Finanzplan erscheinen. Um die Betrachtung einer wärmietenneutralen Modernisierung zu ermöglichen (siehe Abschnitt 5.6.6 <sup>S. 156</sup>), ist auch für die Mieterzonen eine entsprechende Gleichung implementiert. In dieser Gleichung werden die jährlichen Kosten der Versorgungsanlagen durch einen zusätzlichen Faktor auf den umlagefähigen Anteil beschränkt. Der nicht umlagefähige Anteil ist durch den Vermieter zu tragen und bildet die Zahlungsgröße  $CST^{zna}$  in dessen Finanzplan.

### 5.6.5 Einzahlungen aus der Bewirtschaftung von KWK- und PV-Anlagen

Die Erfassung der Einzahlungen aus dem Betrieb von KWK- und PV-Anlagen ist eng verknüpft mit der Modellierung der Energielieferungen im Energieflussgraphen. Abbildung 17 zeigt schematisch die Umsetzung für den Beispielfall eines Vermieters, der auch als KWK-Anlagenbetreiber auftritt.

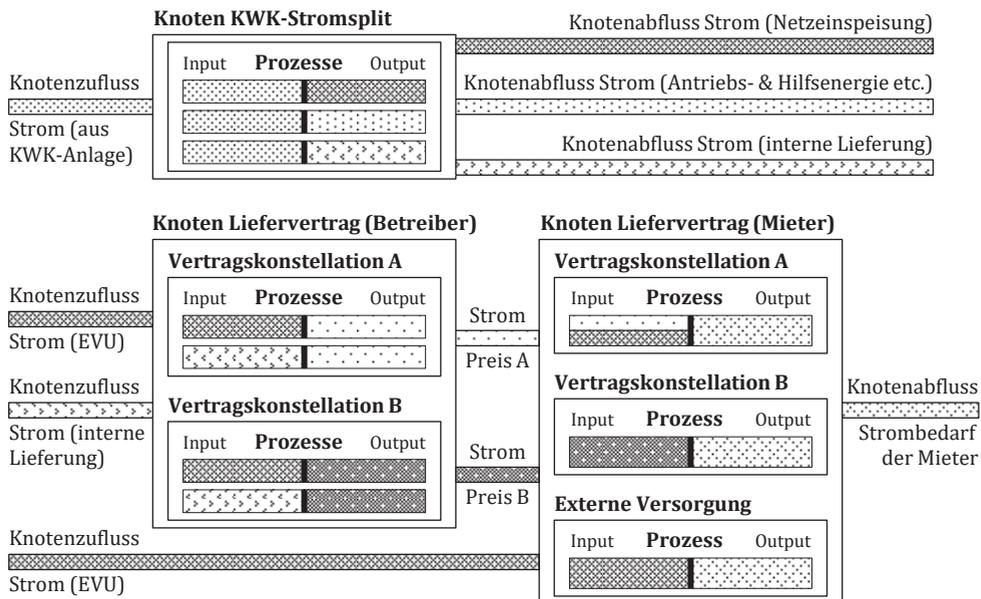


Abbildung 17: Modellierung der KWK-Anlagenbewirtschaftung durch einen Vermieter

Zur Berücksichtigung der drei verschiedenen Nutzungs- bzw. Vermarktungsmöglichkeiten für die erzeugte Elektroenergie, speist der Knoten mit der KWK-Anlage zunächst einen Energieverteilungsknoten. In diesem Verteilungsknoten werden fiktive Umwandlungsprozesse definiert, welche die erzeugte elektrische Energie in objektinterne Versorgungsenergie für das Gebäude (Hilfs- und Antriebsenergie, allgemeine Beleuchtung etc.), in objektinterne Versorgungsenergie für die Mieter und in objektexterne Versorgungsenergie transformieren. Die objektexterne Lieferung – in diesem Fall an den Netzbetreiber der vorgelagerten Netzebene – wird mithilfe eines unbeschränkten Exportflusses abgebildet. Die objektinterne Elektroenergiebereitstellung für die private Stromnutzung der Mieter wird mithilfe von zwei Knoten modelliert, welche das Versorgungsvertragsverhältnis darstellen. Der eine Knoten repräsentiert die Vertragsseite des Anlagenbetreibers als Energielieferant und der andere die Vertragsseite der Mieter als Energieabnehmer.

Diese Modellierungsmethode erlaubt, verschiedene Konstellationen von Vertragsverhältnissen in die Analyse einzubeziehen. Für den dargestellten Beispielfall sei angenommen, dass für einen Lieferpreis A die Hälfte der Mieter bereit wären, einen Versorgungsvertrag mit dem Anlagenbetreiber abzuschließen. Für einen geringeren Lieferpreis B wären dagegen alle Mieter des Gebäudes bereit, sich durch den Anlagenbetreiber mit Elektroenergie versorgen zu lassen. Die dritte Möglichkeit besteht darin, dass der Eigentümer von der Bewirtschaftung einer PV- oder KWK-Anlage Abstand nimmt bzw. alle Mieter einen Liefervertrag mit einem externen Anbieter abschließen. Diese drei Konstellationen werden als einzelne Vertragsvarianten in Form separater Systemoptionen mit jeweils einem Prozess im Vertragsknoten der Abnehmer abgebildet. Die Mieter, die sich extern versorgen, decken ihren Energiebedarf durch den Importfluss, der an diesem Knoten anliegt.

Im Vertragsknoten des Anlagenbetreibers werden die objektinternen Versorgungsverträge ebenfalls als einzelne Systemoptionen mit Prozessen abgebildet. Zusätzlich wird auch an diesem Knoten ein Importfluss für den Elektroenergiebezug von einem externen Anbieter benötigt. Über diesen Fluss bezieht der Anlagenbetreiber die fehlende Energiemenge zur Belieferung seiner internen Kunden, welche er nicht aus seiner KWK-Anlage bereitstellen kann (Reststrombezug).

Die spezifischen Lieferpreise A bzw. B werden durch den Parameter  $cst^{int}$  den internen Lieferflüssen hinterlegt. Zusammen mit dem Aktivitätsniveau des dazugehörigen Vertragsprozesses ergeben sich hieraus die Energiebezugskosten der angeschlossenen Nutzerzone (siehe Nebenbedingung 5.25<sup>S. 153</sup>). Die Auszahlungen der Energienutzer stellen gleichzeitig Einzahlungen für den Anlagenbetreiber dar. Die internen Lieferflüsse werden deshalb durch den Faktor  $opr^{int}$  anteilmäßig den Anlagenbetreibern zugeordnet. Darüber hinaus ermöglicht der Faktor auch die Anpassung der

Einzahlungshöhe. So dient er einerseits zur Reduktion der Einzahlungen um Abgaben und Umlagen (bspw. EEG-Umlage etc.), die für den Anlagenbetreiber nur einen durchlaufenden Posten darstellen, von den Energienutzern aber zu zahlen sind und deshalb in  $cst^{int}$  enthalten sein müssen. Andererseits können durch  $opr^{int}$  die Einzahlungen um Beträge erhöht werden, die mit  $cst^{int}$  nicht berücksichtigt werden können, da sie keine Auszahlungen für den Energienutzer darstellen. Ein Beispiel ist der KWK-Zuschlag, den der Anlagenbetreiber als staatliche Fördermaßnahme für jede erzeugte kWh elektrische Energie erhält, unabhängig davon, wie sie genutzt bzw. vermarktet wird.

Die Einzahlungen  $INC^{opr}$  für einen Anlagenbetreiber ergeben sich aus Gleichung 5.26 und werden in seinem Finanzplankonto erfasst (siehe Abschnitt 5.6.1 S. 143). Die Exportflussparameter  $cst^{exp}$  und  $opr^{exp}$  dienen zur Vorgabe der Konditionen für die objektexterne Energielieferung.

$$INC_{i,y}^{opr} = \sum_{\substack{n \\ \in N}} \sum_{\substack{ec \\ \in EC}} \sum_{\substack{ty \in TY: \\ \exists (y,ty) \\ \in YTY_{y,ty}}} \sum_{\substack{ts \\ \in TS}} \left( \sum_{\substack{n' \in N: \\ n' \neq n}} FA_{n,n',ec,ty,ts}^{int} \cdot cst_{n,n',ec,y,ts}^{int} \cdot opr_{i,n,n',ec}^{int} \right) + FA_{n,ec,ty,ts}^{exp} \cdot cst_{n,ec,y,ts}^{exp} \cdot opr_{i,n,ec}^{exp} \quad (5.26)$$

$$\forall i \in I; \forall y \in Y$$

Das Beispiel soll lediglich das Grundprinzip zur Modellierung der Bewirtschaftung von stromerzeugenden Anlagen verdeutlichen. Anlagengrößen- und/oder energiemengenspezifische Sonderregelungen, wie bspw. die Bagatellgrenze für die reduzierte Eigenstrom-EEG-Umlage, können mit der vorgestellten Abbildungsmethode ebenfalls berücksichtigt werden. Hierfür ist allerdings in Abhängigkeit des Sonderregelungsumfangs eine etwas aufwendigere Modellierung des Energieflussgraphen erforderlich, als in Abbildung 17 dargestellt.

### 5.6.6 Einzahlungen aus der Gebäudebewirtschaftung

Die Bestimmung der Mieteinzahlungen  $INC^{rnt}$  im Finanzplan eines Vermieters (siehe Abschnitt 5.6.1 S. 143) erfolgt in Abhängigkeit der Bestandsdauer der Mietverhältnisse in seiner Nutzerzone. Nebenbedingung 5.27 zeigt zunächst die Ermittlung der gültigen Mietpreise  $RNT$  im betrachteten Jahr  $y$  (zweiter Zeitindex von  $RNT$ ), differenziert für die Jahre, in denen die Mietverhältnisse begonnen haben (erster Zeitindex von  $RNT$ ).

$$RNT_{z,y',y} = rnt_{z,y} \cdot rf_{z,y} \cdot \left( 1 + \sum_{\substack{ac \in AC: \\ \exists (z,ac) \in ZAC_{z,ac}}} rnt_{ac,y}^{ac} \cdot rf_{ac,y}^{ac} \cdot bRNT_{ac,y}^{comp} \right) \quad (5.27) \text{ (a)}$$

$$RNT_{z,y'',y} = RNT_{z,y',y-1} + RNT_{z,y',y}^{incr1} + \sum_{\substack{ty \in TY: \\ ty=y}} RNT_{z,y',ty}^{incr2} + RNT_{z,ty}^{mod} \quad (b)$$

$$\forall z \in Z^t; \forall y \in Y; \forall y' \in Y : y' = y; \forall y'' \in Y : y'' < y$$

Der Einstiegsmietpreis für Neumietter im Jahr  $y$  orientiert sich an dem Vergleichsmietpreisniveau des Gebäudestandorts (siehe Gleichung 5.27a). Das Niveau für den bestehenden Gebäudezustand am Beginn des Analysezeitraums wird durch den Parameter  $rnt$  vorgegeben. Mit dem Faktor  $rf$  kann eine Korrektur des erreichbaren Einstiegsmietpreises, d. h. eine mögliche Überhöhung oder notwendige Unterschreitung des Vergleichspreises, vorgenommen werden.

Durch die Umsetzung von Modernisierungsmaßnahmen können für eine Nutzerzone gegebenenfalls ein höheres Vergleichsmietpreisniveau und entsprechend höhere Einstiegsmietpreisen für den Folgezeitraum erreicht werden. Zur Modellierung eines solchen Mietspiegelleffekts werden Merkmalskategorien  $ac \in AC$  für verschiedene Vergleichsmietpreise definiert, denen jeweils die Faktoren  $rnt^{ac}$  und  $rf^{ac}$  zur Anpassung der erreichbaren Einstiegsmietpreise zugeordnet sind. Diese Anpassungsfaktoren kommen zum Tragen, sofern die vorgegebenen Kriterien der Merkmalskategorie erfüllt sind, d. h.  $bRNT^{comp}$  den Wert eins annimmt.

Mit der dargestellten Form von Nebenbedingung 5.27 können Vergleichsmietpreise für aufeinander aufbauende Merkmalskategorien berücksichtigt werden. Das bedeutet, dass zum Erreichen eines Preisniveaus gleichzeitig auch alle Kriterien der darunterliegenden Niveaus erfüllt sein müssen. Ein Beispiel hierfür ist ein Mietspiegel, der als Merkmal den Primärenergiebedarf des Gebäudes betrachtet. Für diesen Fall unterliegt  $bRNT^{comp}$  einer Nebenbedingung, die ähnlich wie bei der Inanspruchnahme staatlicher Fördermittel im Abschnitt 5.6.2<sup>S. 146</sup> prüft, ob der Gebäudeprimärenergiebedarf unter dem geforderten Grenzwert für das jeweilige Preisniveau liegt. Darüber hinaus ist es aber auch möglich, voneinander unabhängige Kriterien, wie bspw. die Umsetzung einzelner Maßnahmen oder bestimmter Maßnahmenkombinationen, zum Erreichen höherer Vergleichsmietpreisniveaus in die Analyse einzubeziehen. Auf die formale Umsetzung hierzu wird an dieser Stelle jedoch nicht eingegangen.

Der Einstiegsmietpreis der Neumieter ist Ausgangspunkt für ihre Mietpreisentwicklung in den Folgejahren, in denen sie dann als Bestandsmieter zu sehen sind. Der Mietpreis für Bestandsmieter im Jahr  $y$  ergibt sich aus dem Vorjahresmietpreis zuzüglich einer Steigerung  $RNT^{incr1}$  bzw.  $RNT^{incr2}$  und/oder der Modernisierungsumlage  $RNT^{mod}$ , falls eine Modernisierung vorgenommen wurde (siehe Gleichung 5.27b). Für die bestehenden Mietverhältnisse am Anfang des Analysezeitraums bildet der im Bestandsjahr  $y^0$  gültige Mietpreis den Ausgangspunkt für ihre Mietpreisentwicklung.

Die Modellvariable  $RNT^{incr1}$  repräsentiert eine Mietpreisanpassung nach § 558 BGB. Sie wird durch Nebenbedingung 5.28 auf die Differenz zwischen dem aktuell ansetzbaren Vergleichsmietpreis für den Vorjahresgebäudezustand und dem Vorjahresmietpreis beschränkt. Dabei ist zu beachten, dass der Vergleichsmietpreis um Fördermittel für Modernisierungen zu verringern ist, die nach dem Beginn eines Mietverhältnisses in Anspruch genommen wurden. Diese Aufgabe übernimmt die Modellvariable  $FR$ , welche in Abhängigkeit der genutzten Zuschüsse und Zinsverbilligungen für Darlehen ermittelt wird. Die Binärvariable  $bRNT^{incr1}$  nimmt den Wert eins an, sofern eine Mietsteigerung  $RNT^{incr1}$  vorgenommen wird. Sie dient zur Sicherstellung der Lösbarkeit von Nebenbedingung 5.28, falls die Summe aus dem Vorjahresmietpreis und den zu berücksichtigen Fördermitteln größer ist, als der anzusetzende Vergleichsmietpreis. Dieser Umstand kann durch vorgelagerte Modernisierungsumlagen und/oder einen überhöhten Einstiegsmietpreis eintreten.

$$\begin{aligned}
 RNT_{z,y',y}^{incr1} \leq & \ rnt_{z,y} \cdot \left( 1 + \sum_{\substack{ac \in AC: \\ \exists (z,ac) \in ZAC_{z,ac}}} rnt_{ac,y}^{ac} \cdot bRNT_{ac,y-1}^{comp} \right) & (5.28) \\
 & - FR_{z,y',y} - RNT_{z,y',y-1} - big \cdot \left( 1 - bRNT_{z,y',y}^{incr1} \right) \\
 & \forall z \in Z^t; \forall y' \in Y; \forall y \in Y : y > y'; big > FR_{z,y',y} + RNT_{z,y',y-1}
 \end{aligned}$$

Für einen Umsetzungspunkt  $ty$  mit Durchführung von Modernisierungsmaßnahmen repräsentiert  $RNT^{incr1}$  die Anpassung des Mietpreises an den Vergleichsmietpreis vor der Modernisierung. Nach der Anpassung kann sofort die Modernisierungsumlage in  $ty$  aufgeschlagen werden.  $RNT^{incr2}$  stellt dagegen die alternative Möglichkeit für eine Mietpreisanpassung zu einem Umsetzungszeitpunkt dar. In diesem Fall wird zuerst die Modernisierungsumlage auf die Vorjahresmietpreise aufgeschlagen. Anschließend kann im selben Jahr eine Mietpreisanpassung an den ansetzbaren Vergleichsmietpreis

nach der Modernisierung erfolgen, sofern noch ein entsprechender Handlungsspielraum besteht. Hierfür ist  $RNT^{incr2}$  einer zur Nebenbedingung 5.28 ähnlichen Beschränkung unterworfen. Sie gilt lediglich für die Umsetzungszeitpunkte  $ty$  und unterscheidet sich dadurch, dass für  $bRNT^{comp}$  der Wert für  $ty$  anzusetzen ist und eine vorgenommene Modernisierungsumlage in  $ty$  die Möglichkeit zur Preissteigerung über den Weg der Mietpreisanpassung gegebenenfalls schmälert. Sowohl  $RNT^{incr1}$  als auch  $RNT^{incr2}$  unterliegen zwei weiteren Restriktionen, welche die Einhaltung der gesetzlichen Vorgaben zur Sperrfrist und zur Kappungsgrenze bei Mietpreisanpassungen sicherstellen.

Zur Beschränkung der Modernisierungsumlage  $RNT^{mod}$  werden vier Nebenbedingungen formuliert. Die erste begrenzt  $RNT^{mod}$  auf den anrechenbaren Modernisierungsanteil an den Anfangsauszahlungen für die Maßnahmenumsetzung. Die zweite Nebenbedingung berücksichtigt, dass auch für Modernisierungsumlagen die Mietpreisüberhöhungsgrenze gilt. Die dritte Nebenbedingung dient optional zur vereinfachten Berücksichtigung der wirtschaftlichen Mieterbelange, indem die Modernisierungsumlage auf ein vorzugebendes Vielfaches der Energiekostenreduktion im Jahr der Maßnahmenumsetzung beschränkbar ist. Mithilfe der vierten Nebenbedingung kann zusätzlich das Erreichen einer Warmmietenneutralität innerhalb eines vorzugebenden Zeitraums nach jedem Umsetzungszeitpunkt gefordert werden. Hierfür wird  $RNT^{mod}$  vereinfacht auf die durchschnittliche jährliche Reduktion der umlagefähigen Instandhaltungs- und Betriebskosten beschränkt, die innerhalb dieses Zeitraums durch die Maßnahmenumsetzung den Mietern zugutekommt. Da lediglich die Modernisierungsumlage als Bezugsgröße für die Warmmietenneutralität betrachtet wird, könnte diese Vorgabe allerdings durch die Mieterhöhungsmöglichkeiten nach § 558 BGB in gewissem Umfang umgangen werden, sofern durch die Modernisierung ein höheres Vergleichsmietpreisniveau erreicht wird. Dieser Umstand wird hier zunächst in Kauf genommen, da Anpassungen an den Vergleichsmietpreis für den Gebäudeausgangszustand auch ohne Modernisierung möglich sein müssen.

Die Bestimmung der jährlichen Mieteinzahlungen  $INC^{rmt}$  für den Finanzplan eines Vermieters erfolgt letztendlich nach Gleichung 5.29. Der Parameter  $ten$  drückt die Anzahl der seit dem Jahr  $y'$  bestehenden Mietverhältnisse im betrachteten Jahr  $y$  aus. Er wird aus der Anzahl der existierenden Mietverhältnisse zu Beginn des Analysezeitraums und der vorzugebenden Mieterfluktuation bis zum Analysehorizont errechnet. Vereinfachend wird davon ausgegangen, dass die neuen Mietverhältnisse stets die ältesten Mietverhältnisse ersetzen. Weiterhin wird unterstellt, dass die Auflösung eines Mietverhältnisses immer am Ende eines Jahres erfolgt. Für  $y' = y$  entspricht  $ten$  der Anzahl der neuen Mietverhältnisse im betrachteten Jahr.

$$\begin{aligned}
 INC_{z,y}^{rnt} = & \left( \begin{aligned} & rnt_{z,y} \cdot rf_{z,y} \cdot vf_{z,y} \cdot \sum_{\substack{y' \in Y: \\ y' = y}} ten_{z,y',y} \\ & 1 + \sum_{\substack{ac \in AC: \\ \exists (z,ac) \in ZAC_{z,ac}}} rnt_{ac,y}^{ac} \cdot rf_{ac,y}^{ac} \cdot vf_{ac,y}^{ac} \cdot bRNT_{ac,y}^{comp} \\ & + \sum_{\substack{y' \in Y: \\ y' < y}} RNT_{z,y',y} \cdot ten_{z,y',y} \end{aligned} \right) \cdot ar_{z,y}^l \cdot 12 \quad (5.29)
 \end{aligned}$$

$\forall z \in Z^t; \forall y \in Y$

Der Parameter  $vf$  reduziert die Mieteinzahlungen der Neumieter im Einzugsjahr um die Mietausfälle während der Leerstandzeit vor dem Beginn des neuen Mietverhältnisses. Da der Modernisierungsgrad des Gebäudes oftmals einen wesentlichen Einfluss auf die Dauer der Leerstandzeiten hat, wird zusätzlich der Faktor  $vf^{ac}$  definiert, mit dem die erreichbare Leerstandzeitreduktion durch Modernisierungsmaßnahmen berücksichtigt werden kann. Die Dauer der Leerstandzeit beeinflusst gleichzeitig auch die Leerstandskosten  $CST^{vt}$  im Finanzplan des Vermieters.

### 5.6.7 Absetzung für Abnutzung

Die Ermittlung der AfA-Beträge erfolgt aufgrund der aus steuerrechtlicher Sicht unterschiedlich zu behandelnden Bereiche Eigennutzung, Vermietung und Anlagenbewirtschaftung getrennt für die jeweils zurechenbaren Investitionsanteile eines Eigentümers. Das Modell beschränkt sich auf den Ansatz linearer Absetzungen, da diese den Regelfall darstellen.

Für Investitionsanteile, die den Nutzerzonen zuzurechnen sind, wird der jährliche Absetzungsbetrag für eine Systemoption in Abhängigkeit der Absetzungsdauer  $l_{tt}^u$  durch Nebenbedingung 5.30 bestimmt. Eine ähnliche Nebenbedingung wird für die AfA-Beträge im Bereich der Anlagenbewirtschaftung formuliert. Die Möglichkeit der steuerlichen Berücksichtigung von Modernisierungen für Eigennutzer wird als Analyseoption implementiert.

$$DPR_{u,z,ty,y}^z \leq \frac{\sum_{\substack{i \in I: \\ \exists (i,z) \in IZ_{i,z}}} \left( \begin{array}{c} \left( EQU_{i,u,ty}^m + \sum_{d \in (D^a \cup D^r)} \begin{pmatrix} DBT_{i,u,d,ty,y'}^{rm} \\ -DBT_{i,u,d,ty,y'}^{gr} \end{pmatrix} \right) \\ \cdot \left( \frac{ctr_{z,u}}{opr_{i,u} + \sum_{\substack{z' \in Z: \\ \exists (i,z') \in IZ_{i,z'}}} ctr_{z',u}} \right) \end{array} \right)}{ltt_{u,ty}^u} \quad (5.30)$$

$$\forall u \in U; \forall z \in (Z^o \cup Z^t); \forall ty \in TY; \forall y' \in Y : y' = ty; \forall y \in Y$$

In der Regel steht der Absetzungszeitraum für eine Maßnahme von vornherein fest. Er ist abhängig davon, ob die Maßnahme als Herstellungs- oder Erhaltungsaufwand zu interpretieren ist und ob sie ein selbständiges Wirtschaftsgut oder einen Teil des Wirtschaftsgutes „Gebäude“ betrifft. In diesem Fall ist Nebenbedingung 5.30 zur Bestimmung der AfA-Beträge ausreichend. Für vermietete Zonen ist die Besonderheit zu beachten, dass Modernisierungsmaßnahmen, die für sich allein genommen Aufwendungen zum Erhalt des Gebäudes darstellen, in Abhängigkeit des Maßnahmenumfangs gegebenenfalls als Herstellungsaufwand zu sehen sind (Standardsprungregelung). Die Absetzungszeiträume stehen in diesem Fall nicht von vornherein fest, sondern ergeben sich erst aus der Modellentscheidung zur gesamten Maßnahmenumsetzung im Analysezeitraum.

Um diese Gegebenheiten berücksichtigen zu können, ist Nebenbedingung 5.30 als Ungleichung formuliert. Sie beschränkt sich auf die Begrenzung des maximal möglichen Jahresabschreibungsbetrags, indem für den Parameter  $ltt^u$  der aus steuerrechtlicher Sicht kürzeste Abschreibungszeitraum vorgegeben wird. Die Beschränkung der AfA-Beträge für den Fall eines Standardsprunges übernimmt Nebenbedingung 5.31.

$$\begin{aligned}
 DPR_{u,z,ty,y}^z \leq & \frac{\sum_{\substack{i \in I: \\ \exists (i,z) \in IZ_{i,z}}} \left( \begin{array}{c} \left( EQU_{i,u,ty}^m + \sum_{d \in (D^a \cup D^r)} \begin{pmatrix} DBT_{i,u,d,ty,y'}^{rm} \\ -DBT_{i,u,d,ty,y'}^{gr} \end{pmatrix} \right) \\ \cdot \frac{ctr_{z,u}}{opr_{i,u} + \sum_{\substack{z' \in Z: \\ \exists (i,z') \in IZ_{i,z'}}} ctr_{z',u}} \end{array} \right)}{ltt_{z,ty}^z} \quad (5.31) \\
 & + big \cdot (1 - bUPG_{z,ty}) \\
 & \forall u \in U; \forall z \in Z^t; \forall ty \in TY; \forall y' \in Y : y' = ty; \forall y \in Y; big > INV_{u,ty}
 \end{aligned}$$

Die Binärvariable  $bUPG$  in dieser Ungleichung ist an weitere Nebenbedingungen gebunden. Sie stellen sicher, dass  $bUPG$  den Wert eins annimmt, sofern die Kriterien für einen Standardsprung innerhalb eines vorzugebenden Bezugszeitraums erfüllt sind. In diesem Fall werden alle in diesem Zeitraum durchgeführten und der Zone zurechenbaren Maßnahmen als Herstellungsaufwand betrachtet und über den steuerlichen AfA-Zeitraum der Zone  $ltt^z$  linear abgesetzt. Als Standardsprungkriterien können bestimmte Maßnahmenkombinationen und/oder die durchschnittliche Mietpreissteigerung innerhalb des Bezugszeitraums festgelegt werden.

## 5.7 Zielfunktionen

Entsprechend den im Unterkapitel 4.4<sup>S.81</sup> herausgearbeiteten Zielsetzungen Einkommensmaximierung, Vermögensmaximierung und Primärenergiebedarfsminimierung werden für das Modell drei alternative Zielfunktionen formuliert. Die erste Analysevariante mit Zielfunktion 5.32 dient der Entscheidungsunterstützung von Gebäudeeigentümern, die den Vermögenswert  $ACAM$  am Ende des Planungszeitraums maximieren möchten. Dieser ergibt sich aus der Summe des liquiden Mittelbestandes  $EQU^s$  und den Restwerten  $RES$  der Systemkomponenten zu diesem Zeitpunkt. Geplante Mittelentnahmen während des Analysezeitraums können fix vorgegeben werden.

$max$ 

(5.32)

$$ACAM = \sum_{\substack{y \in Y: \\ y = y^e}} \sum_{i \in I} \left( EQU_{i,y}^s + \sum_{ty \in TY} \sum_{u \in U} \left( \begin{array}{c} RES_{u,ty,y} \cdot res_{u,ty} \\ \left( opr_{i,u} + \sum_{\substack{z \in Z: \\ \exists (i,z) \in IZ_{i,z}}} ctr_{z,u}} \right) \end{array} \right) \right) \cdot wf_i$$

$EQU^s$  beinhaltet keine Mittel aus der kurzfristigen Ergänzungsfinanzierung, da annehmegema sämtliche Fremdmittel bis zum Analysehorizont getilgt sein sollen. Enthalten sind aber die Anfangsauszahlungen für die langfristigen Kapitalanlagen, da diese am Ende des Planungszeitraums zurückgezahlt werden. Der Restwert  $RES$  einer zum Zeitpunkt  $ty$  umgesetzten Maßnahme am Ende des Planungszeitraums wird aus der Anfangsauszahlung und dem Verhaltnis der noch verbleibenden Nutzungsdauer zur gesamten technischen Nutzungsdauer bestimmt. Der Parameter  $res$  erlaubt eine Korrektur dieses Restwertes, um einen vom linearen Werteverzehr abweichenden Wert berücksichtigen zu können. Treten mehrere Investoren als Teileigentümer des betrachteten Gebäudes auf, ist ein Maßnahmenbündel umzusetzen, das die Zustimmung aller Beteiligten findet. Der Wichtungsfaktor  $wf$  spiegelt den Entscheidungseinfluss des einzelnen Teileigentumers wider.

Die zweite Analysevariante mit Zielfunktion 5.33 richtet die Modernisierungsentscheidung an der Entnahmemoglichkeit liquider Mittel aus. Maximiert wird die Mittelentnahme  $DIAM$ , die der Mittelentnahme  $EQU^{dis}$  im ersten Jahr des Analysezeitraums entspricht.

 $max$ 

(5.33)

$$DIAM = \sum_{\substack{y \in Y: \\ y = y^1}} \sum_{i \in I} EQU_{i,y}^{dis} \cdot wf_i$$

Mithilfe der zusätzlichen Nebenbedingung 5.34 für diese Analysevariante wird eine Beziehung zwischen  $EQU^{dis}$  des ersten Jahres und aller folgenden Jahre hergestellt. Der Faktor  $dis$  dient zur Vorgabe des Entnahmeverhältnisses zwischen den Jahren. Eine weitere Nebenbedingung fordert die Einhaltung eines vorzuziehenden Mindestvermögenswertes für jeden Eigentümer am Ende des Analysezeitraums. Dieser Endwert ergibt sich wiederum aus der Summe seines liquiden Mittelbestandes und den Restwertanteilen der Systemkomponenten, welche ihm zuzurechnen sind.

$$EQU_{i,y}^{dis} = dis_{i,y} \cdot \sum_{\substack{y \in Y: \\ y = y^1}} EQU_{i,y}^{dis} \quad (5.34)$$

$$\forall i \in I; \forall y \in Y : y > y^1$$

Die dritte Analysevariante mit Zielfunktion 5.35 führt die Modelllösung zur größtmöglichen Reduktion des Gebäudeprimärenergiebedarfs im Analysezeitraum, welche durch den bzw. die Eigentümer unter den vorgegebenen Rahmenbedingungen finanzierbar ist. Dabei können für jeden Eigentümer geplante Entnahmen von liquiden Mitteln berücksichtigt und die Einhaltung eines Mindestvermögensendwertes gefordert werden. Wird dieser auf den Endwert der Unterlassungsalternative festgelegt, zeigt die Modelllösung die wirtschaftliche Grenze zur Reduktion des Primärenergiebedarfs auf.

$$\min \quad (5.35)$$

$$PEAM = \frac{\sum_{b \in B} \sum_{ty \in TY} \sum_{\substack{y \in Y: \\ \exists (y,ty) \in YTY_{y,ty}}} PE_{b,ty}}{\sum_{\substack{y \in Y: \\ y = y^1}} \sum_{\substack{y' \in Y: \\ y' = y^e}} dr_{y,y'}^{se}}$$

# Kapitel 6

## Modellgestützte Analysen der Modernisierungsentscheidung

Im Folgenden wird die Anwendung und Aussagekraft des *BRIAMO*-Modells anhand von zwei exemplarischen Fallstudien demonstriert. Deren Charakterisierung erfolgt zusammen mit der Vorstellung der zu betrachtenden Szenarien im Unterkapitel 6.1. Im Unterkapitel 6.2<sup>S.167</sup> werden die wichtigsten Eingangsdaten für die Untersuchungen aufgeführt. Die Analyseergebnisse werden in den Unterkapiteln 6.3<sup>S.186</sup> und 6.4<sup>S.199</sup> erörtert. Unterkapitel 6.5<sup>S.210</sup> beinhaltet noch einige allgemeine Informationen zum Modell sowie zur Problemgröße der durchgeführten Modellläufe.

### 6.1 Definition der Fallstudien und Szenarien

Die Modernisierungsentscheidung wird für ein exemplarisches Mehrfamilienhaus analysiert. Das 1974 errichtete freistehende Gebäude umfasst zwölf gleichgroße Wohneinheiten, die sich über vier Geschosse verteilen. Der begehbare Dachraum ist nicht ausgebaut. Die Wärmeversorgung erfolgt über ein gebäudezentrales Heizwärme- und Warmwasserversorgungssystem. 1994 wurden bereits einige energie-relevante Modernisierungen durchgeführt. Diese beinhalteten den Austausch des Wärmeerzeugers und des Warmwasserspeichers. Gleichzeitig umgesetzte Wärmeschutzmaßnahmen beschränkten sich auf die Dämmung der obersten Geschossdecke. An den Außenwänden wurde eine Instandsetzung der vorhandenen Bausubstanz inklusive eines neuen Anstrichs vorgenommen. Die Fenster sind regelmäßig gewartet worden. Gemäß den Bestimmungen der EnEV wurde inzwischen eine Dämmung der frei zugänglichen Versorgungsleitungen außerhalb der thermischen Hülle nachgerüstet. Ein hydraulischer Abgleich der Heizungsanlage ist bereits erfolgt.

Dieses Beispielgebäude stellt für beide Fallstudien gleichermaßen den Ausgangspunkt dar. Für den ersten Anwendungsfall wird unterstellt, dass das Wohngebäude ausschließlich von Eigennutzern bewohnt wird. Die Modernisierungsentscheidung wird aus Sicht der Wohnungseigentümergeinschaft als einzelner Investor betrachtet. Der zweite Anwendungsfall nimmt die Perspektive eines Gebäudebewirtschafters ein, der als einzelner Eigentümer alle Wohneinheiten vermietet. Für jede der beiden Fallstudien wird die Entscheidungssituation unter drei verschiedenen Gesichtspunkten in Form von Basisszenarien untersucht (siehe Tabelle 7).

**Tabelle 7:** Übersicht zu den Fallstudien und Szenarien

Fallstudien	Basisszenarien	Szenarien mit Parametervariation
Eigennutzer (E)	Ohne geplante Instandsetzung ( <b>FREI</b> ) Es bestehen keine Handlungszwänge Zielsetzung: Vermögensendwertmaximierung	keine
	Mit geplanter Instandsetzung ( <b>INST</b> ) Austausch Wärmeerzeuger, Warmwasserspeicher und Fenster sowie Außenwandanstrich Zielsetzung: Vermögensendwertmaximierung	Variation der Entwicklung des Energiepreisniveaus ( <b>EP++/+/-/--</b> ) und des Zinssatzniveaus ( <b>ZS++/+/-/--</b> )
	Minimierung des Primärenergiebedarfs ( <b>MPEB</b> )	keine
Vermieter (V)	Ohne geplante Instandsetzung ( <b>FREI</b> ) Es bestehen keine Handlungszwänge Zielsetzung: Vermögensendwertmaximierung	keine
	Mit geplanter Instandsetzung ( <b>INST</b> ) Austausch Wärmeerzeuger, Warmwasserspeicher und Fenster sowie Außenwandanstrich Zielsetzung: Vermögensendwertmaximierung	Variation der Entwicklung des Vergleichsmietpreisniveaus ( <b>MP++/+/-/--</b> ) und des Zinssatzniveaus ( <b>ZS++/+/-/--</b> )
	Minimierung des Primärenergiebedarfs ( <b>MPEB</b> )	keine

Das erste Basisszenario der Fallstudien (FREI) betrachtet die Entscheidungssituation unter der Annahme, dass Instandsetzungen noch nicht als notwendig erachtet werden und möglichst lang hinauszuzögern sind. Zum betrachteten Umsetzungszeitpunkt sind also keine Instandsetzungen vorgesehen. Mit diesen Szenarien wird untersucht, ob eine sofortige Durchführung von Modernisierungsmaßnahmen aus rein wirtschaftlichen Beweggründen heraus für die Eigentümer vorteilhaft wäre. Deshalb werden hier die ordnungsrechtlichen Zwänge der EnEV 2014 hinsichtlich Nachrüstpflichten und einzuhaltender Kennwerte bei den zu empfehlenden Maßnahmen bewusst ignoriert. Als Zielsetzung wird die Maximierung des Vermögensendwertes betrachtet.

In den Szenarien mit geplanten Instandsetzungen (INST) wird dagegen unterstellt, dass ein Ersatz des Wärmeerzeugers, des Warmwasserspeichers und der Fenster im Rahmen der turnusmäßigen Erneuerungen bzw. Instandsetzungen zum betrachteten

Umsetzungszeitpunkt vorgesehen ist. Zusätzlich soll die Außenwand einen neuen Anstrich erhalten. Die Anforderungen der EnEV 2014 sind zu erfüllen. Als Zielsetzung der Eigentümer wird ebenfalls die Maximierung des Vermögenswertes betrachtet. Analysiert wird, welche Ersatzmaßnahmen zu empfehlen sind und inwiefern zusätzliche Maßnahmen im Zuge der geplanten Arbeiten aus wirtschaftlicher Sicht gleichzeitig mit durchgeführt werden sollten.

Mit dem dritten Basisszenario der Fallstudien (MPEB) wird schließlich die wirtschaftliche Grenze einer sofortigen, möglichst hohen Reduktion des Primärenergiebedarfs ausgelotet. Hierbei wird gefordert, dass der Endwert mindestens das Niveau der Unterlassungsalternative erreichen muss.

Für die zwei Basisszenarien mit geplanter Instandsetzung wird mithilfe weiterer Szenarien zusätzlich die Empfindlichkeit der Modellentscheidungen gegenüber unsicheren Eingangsparametern untersucht. Die Auswahl der Parameter orientiert sich einerseits am Unsicherheitsgrad und andererseits an der zu erwartenden Einflussstärke ihrer Variation auf das Modellergebnis. Für den Eigennutzerfall werden unterschiedliche Energiepreisentwicklungen betrachtet. Für den Vermieterfall wird dagegen die Abweichung erwarteter Vergleichsmietpreise analysiert. Für beide Anwendungsfälle wird zusätzlich eine Variation des zukünftigen Zinssatzniveaus vorgenommen.

## 6.2 Modellaufbau und Datengrundlage

Die Zonierung des betrachteten Gebäudes und die Gliederung des Analysezeitraums werden auf möglichst kurze Rechenzeiten für die Anwendungsfälle ausgerichtet. Es wird davon ausgegangen, dass eine einheitliche Nutzungsstruktur und einheitliche ökonomische Rahmenbedingungen für die Wohneinheiten des Gebäudes vorliegen. Alle Wohneinheiten werden deshalb in einer Nutzerzone zusammengefasst.

Als Bestandsjahr wird das Jahr 2014 festgelegt. Die Länge des Analysezeitraums wird auf 20 Jahre beschränkt (Anfang 2015 bis Ende 2034). Es wird lediglich ein Umsetzungszeitpunkt am Beginn des Analysezeitraums betrachtet (Umsetzungszeitpunkt = Anfang 2015). Für vorhandene Bauteile und Anlagen, die voraussichtlich nicht mehr bis zum Analysehorizont einsetzbar sind, werden im Laufe des Analysezeitraums Auszahlungen für Instandsetzungs- bzw. Ersatzmaßnahmen berücksichtigt. Der Restwert von Systemgestaltungsoptionen, deren übliche Nutzungsdauer über den Analysehorizont hinausreicht, ergibt sich aus den Anfangsauszahlungen und der linearen Wertminderung bis zu diesem Zeitpunkt.

Zur Abbildung der unterjährigen Energiebedarfsstruktur und zur Analyse des Anlageneinsatzes werden lediglich 3 Typwochen mit jeweils einem Typtag definiert. Im Folgenden wird deshalb nur noch die Bezeichnung „Typtag“ verwendet. Der erste Typtag repräsentiert die kältesten Wintertage. Der zweite Typtag steht stellvertretend für die Tage der heizfreien Sommerzeit. Die restlichen Tage des Jahres werden durch den dritten Typtag für die Übergangszeiten dargestellt. Jeder Typtag ist in viertelstündliche Zeitschritte untergliedert. Eine Ausnahme bilden die Nachtstunden zwischen 23:00 Uhr und 4:30 Uhr. Diese werden zu einer Zeitscheibe zusammengefasst. Ein Jahr wird damit durch insgesamt 225 Zeitscheiben repräsentiert.

Im Folgenden werden wesentliche Eingangsdaten für die Analysen vorgestellt. Sofern nicht anders gekennzeichnet, handelt es sich um eigene Annahmen für die Fallstudien. Die techno-ökonomischen Parameter der Systemoptionen orientieren sich weitgehend an vergleichbaren Werten aus der Literatur sowie an Herstellerangaben (Stand 2014). Auf die berücksichtigten Quellen wird an entsprechender Stelle verwiesen.

## 6.2.1 Gebäudeausgangszustand

In Tabelle 8 sind Angaben zu den Flächen, zu den vorhandenen Versorgungsanlagen und zum energetischen Ausgangszustand des betrachteten Gebäudes zusammengefasst. Die Kennwerte wurden mit einer zugelassenen Software zur Berechnung der energetischen Niveaus für KfW-Effizienzhäuser nach DIN V 4108-6/4701-10 ermittelt.

**Tabelle 8:** Kennwerte des betrachteten Gebäudes im Ausgangszustand

Gebäudenutzfläche $A_N$ Wohnfläche Nutzerzone	1010 m <sup>2</sup> 840 m <sup>2</sup> (12 Wohneinheiten zu je 70 m <sup>2</sup> )
Dachflächen (Satteldach)	Ausrichtung Nord/Süd jeweils 163 m <sup>2</sup> mit 30° Neigung (130 m <sup>2</sup> nutzbar für PV- und solarthermische Anlagen)
Thermische Hülle (Fläche   U-Wert )	Oberste Geschossdecke: 267 m <sup>2</sup>   0,56 W/m <sup>2</sup> K Außenwand Nord: Opak: 229 m <sup>2</sup>   0,90 W/m <sup>2</sup> K Transparent: 58 m <sup>2</sup>   2,80 W/m <sup>2</sup> K Außenwand Süd: Opak: 218 m <sup>2</sup>   0,90 W/m <sup>2</sup> K Transparent: 69 m <sup>2</sup>   2,80 W/m <sup>2</sup> K Außenwände Ost/West jeweils: Opak: 107 m <sup>2</sup>   0,90 W/m <sup>2</sup> K Transparent: 23 m <sup>2</sup>   2,80 W/m <sup>2</sup> K Kellerdecke: 267 m <sup>2</sup>   1,05 W/m <sup>2</sup> K
Versorgungsanlagen	Gaskessel ohne Brennwertnutzung 65 kW Speicher-Wassererwärmer 750 l
Spez. Primärenergiebedarf $q_p$	Bestandsgebäude 173,3 kWh/m <sup>2</sup> a Referenzwert vergleichbarer Neubau 53,3 kWh/m <sup>2</sup> a
Spez. Transmissionswärmeverlust $H_{T'}$	Bestandsgebäude: 1,11 W/m <sup>2</sup> K Referenzwert vergleichbarer Neubau: 0,50 W/m <sup>2</sup> K

Die Wärmeversorgung des Gebäudes wird im Ausgangszustand durch einen zentralen Gaskessel ohne Brennwertnutzung und einen Speicher-Wassererwärmer sichergestellt. Beide befinden sich außerhalb der thermischen Hülle im Kellergeschoss. Die Vorlauftemperatur des Heizsystems beträgt für den Wintertyp tag ca. 70 °C. Während der Übergangszeit verringert sie sich im Mittel auf 45 °C. Die Abgabetemperatur des Warmwasserspeichers ist auf mindestens 60 °C zu halten [85]. Die Zirkulationsanlage wird zwischen 23:00 und 4:30 Uhr abgeschaltet.

### 6.2.2 Systemgestaltungsoptionen zur Modernisierung

Als Systemgestaltungsoptionen zur energetischen Modernisierung werden verschiedene Wärmebereitstellungsanlagen, Wärmespeicher, Dämmstandards und Fenstervarianten in Betracht gezogen. Tabelle 9 zeigt eine Aufstellung zusammen mit den angenommenen techno-ökonomischen Parametern. Die Auszahlungen für die Instandhaltung orientieren sich an den Mittelwerten der VDI 2067 über die Nutzungsdauern der Systemoptionen sowie an Herstellerangaben und Angeboten entsprechender Servicedienstleister (Stand 2014). Für die Entwicklung der Instandhaltungsausgaben wird eine jährliche Steigerungsrate von 1,5 % unterstellt.

Die vorhandenen Versorgungsanlagen können mit hoher Wahrscheinlichkeit nicht mehr bis zum Analysehorizont genutzt werden. Um die Vergleichbarkeit zwischen der zum betrachteten Umsetzungszeitpunkt möglichen Maßnahmenunterlassung (Szenario FREI) und der sofortigen Maßnahmenumsetzung (Szenario INST) zu gewährleisten, werden folgende Festlegungen zum Ersatz bzw. zur Instandsetzung der bestehenden Komponenten im Laufe des Analysezeitraums getroffen: Für den vorhandenen Gaskessel und den Speicher-Wassererwärmer wird davon ausgegangen, dass diese in spätestens 10 Jahren auszutauschen sind. Zu diesem Zeitpunkt fallen Auszahlungen für entsprechende Ersatzanlagen an, falls der sofortige Austausch unterbleibt. Für die Bestandsfenster und die Außenwand wird spätestens in 10 Jahren eine Grundüberholung inklusive eines neuen Anstrichs notwendig. Die Auszahlungen hierfür entfallen, falls zum Umsetzungszeitpunkt neue Fenster eingesetzt werden bzw. die Dämmung der Außenwand erfolgt.

Grundsätzlich wird die Festlegung getroffen, dass die Dämmung der Außenwand nur im Zusammenhang mit dem Austausch der Bestandsfenster vorgenommen werden soll. Änderungen an den Anlagen zur Heizwärmeverteilung bzw. -übergabe sind in den Fallstudien nicht vorgesehen. Im Hinblick auf die oben genannten Temperaturniveaus zur Warmwasser- und Heizwärmeversorgung sind die Einsatzbedingungen für eine elektrische Kompressionswärmepumpe nicht ideal. Zwar bieten einige Hersteller Anlagen an, welche die vorgegebenen Temperaturen bereitstellen können, jedoch nur

unter Inkaufnahme relativ geringer Leistungszahlen. Die erreichbaren Nutzungsgrade werden dementsprechend niedrig angesetzt, um das Energieeinsparpotenzial und die Wirtschaftlichkeit dieser Versorgungsoption nicht zu überschätzen.

**Tabelle 9:** Systemgestaltungsoptionen mit ausgewählten Parametern<sup>127</sup>

Systemgestaltungsoption	Technische Parameter		Ökonomische Parameter		
			fixe Auszahlungen	größen-/einsatzabhängige Auszahlungen	
Gasbrennwertkessel inkl. Schornsteinsanierung	$eff$ 0,98	$ltp$ 25 a	$inv^{fix}$ 4.300 € $cst^{fix}$ 110 €	$inv^{cap}$ 90 €/kW $cst^{cap}$ 2 €/kW	
Elektrisch betriebene Wasser-Wasser-Kompressionswärmepumpe inkl. Brunnen	$eff_{wi}$ 2,2 $eff_{üb}$ 4,4 $eff_{ww}$ 2,8	$ltp$ 25 a	$inv^{fix}$ 18.000 € $cst^{fix}$ 350 €	$inv^{cap}$ 190 €/kW $cst^{cap}$ 2 €/kW	
KWK-Anlage (Gasmotor) inkl. Netzanschluss und Abnahme	< 4 kW <sub>el</sub>	$ltp$ 20 a	$inv^{fix}$ 12.000 €	$inv^{cap}$ 4.000 €/kW <sub>el</sub> $cst^{act}$ 0,05 €/kWh <sub>el</sub>	
	4 – 10 kW <sub>el</sub>			$inv^{cap}$ 2.200 €/kW <sub>el</sub> $cst^{act}$ 0,05 €/kWh <sub>el</sub>	
	> 10 kW <sub>el</sub>			$inv^{cap}$ 1.300 €/kW <sub>el</sub> $cst^{act}$ 0,04 €/kWh <sub>el</sub>	
Solarthermieanlage Flachkollektor (Bezug Bruttokollektorfläche)	Potenzieller Ertrag: 550 kWh/m <sup>2</sup> a	$ltp$ 25 a	$inv^{fix}$ 3.850 € $cst^{fix}$ 140 €	$inv^{cap}$ 250 €/m <sup>2</sup> $cst^{cap}$ 6,5 €/m <sup>2</sup>	
PV-Anlage inkl. Netzanschluss und Abnahme	Ertrag: 950 kWh/kW <sub>p</sub>	$ltp$ 25 a	$inv^{fix}$ 1.000 € $cst^{fix}$ 330 €	$inv^{cap}$ 2.000 €/kW <sub>p</sub> $cst^{cap}$ 5,5 €/kW <sub>p</sub>	
Speicher-Wassererwärmer/ Warmwasserspeicher	monovalent	$hlf$ 3,1 kWh/d	$ltp$ 25 a	$inv^{fix}$ 600 €	$inv^{cap}$ 4.800 €/m <sup>3</sup> $cst^{cap}$ 50 €/m <sup>3</sup>
	bivalent				$inv^{cap}$ 5.300 €/m <sup>3</sup> $cst^{cap}$ 50 €/m <sup>3</sup>
Heizwärmepufferspeicher	$hlf$ 3,3 kWh/d	$ltp$ 25 a		$inv^{cap}$ 2.700 €/m <sup>3</sup> $cst^{cap}$ 30 €/m <sup>3</sup>	
Dämmung der Warmwasserzirkulation nach EnEV-Standard inkl. Instandsetzung		$ltp$ 50 a	$inv^{fix}$ 8.000 €		
Dämmung oberste Geschossdecke	0,24 – 0,15 kWh/m <sup>2</sup> K	$ltp$ 50 a	$inv^{fix}$ 8.500 €	$inv^{cap}$ 70 €/(kWh/m <sup>2</sup> K)	
	< 0,15 kWh/m <sup>2</sup> K			$inv^{cap}$ 180 €/(kWh/m <sup>2</sup> K)	
Dämmung Außenwand	0,24 – 0,18 kWh/m <sup>2</sup> K	$ltp$ 40 a	$inv^{fix}$ 77.000 €	$inv^{cap}$ 40 €/(kWh/m <sup>2</sup> K)	
	< 0,18 kWh/m <sup>2</sup> K			$inv^{cap}$ 135 €/(kWh/m <sup>2</sup> K)	
Dämmung Kellerdecke	0,3 – 0,20 kWh/m <sup>2</sup> K	$ltp$ 50 a	$inv^{fix}$ 8.500 €	$inv^{cap}$ 35 €/(kWh/m <sup>2</sup> K)	
	< 0,20 kWh/m <sup>2</sup> K			$inv^{cap}$ 120 €/(kWh/m <sup>2</sup> K)	
Fernster Wärmeschutzverglasung	2-fach 1,3 kWh/m <sup>2</sup> K	$ltp$ 40 a	$inv^{fix}$ 65.000 €		
	3-fach 0,8 kWh/m <sup>2</sup> K			$inv^{fix}$ 75.000 €	

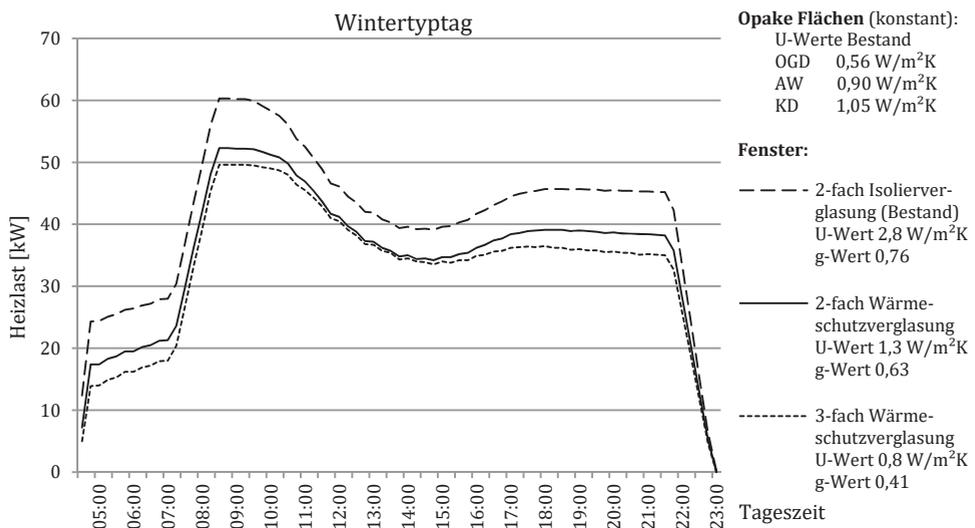
<sup>127</sup> In Anlehnung an [13/35/36/95/101/147/202/222/248/284] sowie verschiedene Hersteller-/Dienstleisterangaben und eigene Annahmen. Nutzungsgrad  $eff$  der gasbetriebenen Anlagen bezogen auf H<sub>i</sub>. Bereitschaftswärmeaufwand  $hlf$  pro Tag bei 45 Kelvin Temperaturdifferenz. Indizes: wi = Heizung Wintertyp, üb = Heizung Übergangstyp, ww = Wassererwärmung, el = elektrisch, th = thermisch. Anfangsauszahlungen  $inv$  inkl. Anlage/Material, Lieferung und Montage. Auszahlungen  $cst$  für Instandhaltung und Betrieb (ohne Auszahlungen für Energiebezug) inkl. Inspektion, Reinigung, Wartung, Reparatur/Verschleißteilaustausch und Instandsetzung/Generalüberholung sowie zusätzliche Energiezählermieten und Versicherungen. Für die PV- und die KWK-Anlage sind Nettobeträge angegeben.

### 6.2.3 Energiebedarfsstruktur

Das betrachtete Gebäude hat im Ausgangszustand einen jährlichen Heizwärmebedarf von 90.600 kWh. Der Wärmebedarf für Warmwasser beläuft sich auf 12.600 kWh pro Jahr. Der jährliche elektrische Energiebedarf für eine Wohneinheit wird mit durchschnittlich 2.500 kWh angenommen. Zur Abbildung der Energieeinanspruchnahme in den Zeitscheiben der Typtage werden Bedarfsprofile im Modell hinterlegt.

Zur Bestimmung der unterjährigen Struktur des Heizwärmebedarfs wird zunächst der Heizlastverlauf des Gebäudes im Ausgangszustand mit der Simulationssoftware *TRNSYS* ermittelt. Die Simulation erfolgt mit viertelstündlicher Schrittweite für ein Jahr. Auf Grundlage des simulierten Lastgangs wird eine Heizlastprofilerstellung für die drei Typtage vorgenommen. Der Wintertyptag repräsentiert den durchschnittlichen Lastverlauf der kältesten Tage, deren Heizwärmebedarf mindestens 60 % des maximalen Tagesheizwärmebedarfs im Jahr erreicht. Die restlichen Tage mit Heizwärmebedarf werden zur Profilerstellung für den Übergangstyp tag herangezogen. Um die Änderung der Heizlaststruktur in Abhängigkeit der gewählten Fenstervariante sowie des Außenwand- und Deckendämmstandards zu bestimmen, werden weitere Simulationen mit Variation der entsprechenden Bauteilparameter durchgeführt.

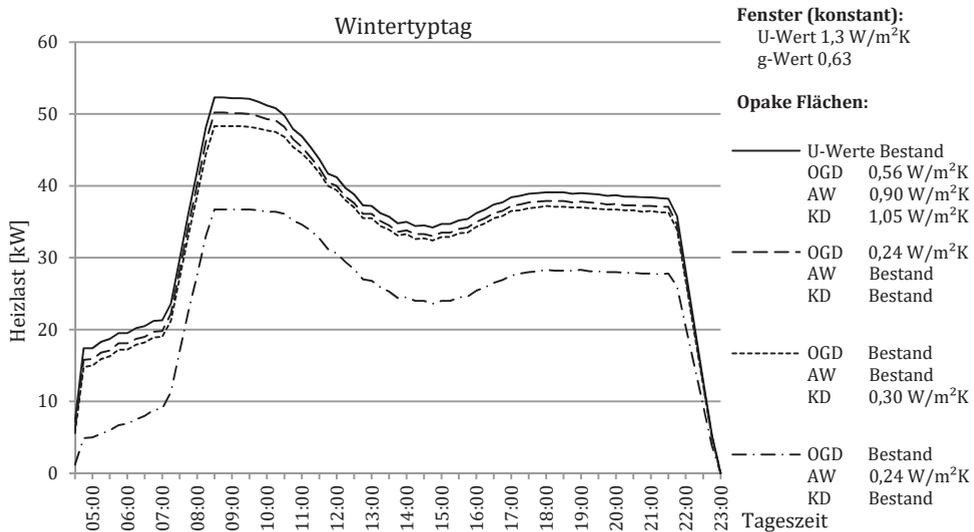
Im ersten Schritt werden die Einzeleffekte der transparenten Flächen untersucht. Abbildung 18 zeigt für den Wintertyptag den Einfluss der Fenstervarianten auf den Heizlastverlauf bei unverändertem Dämmstandard der opaken thermischen Hülle.



**Abbildung 18:** Heizlastverlauf am Wintertyptag in Abhängigkeit der genutzten Fenstervariante bei unverändertem Dämmstandard der opaken thermischen Hülle

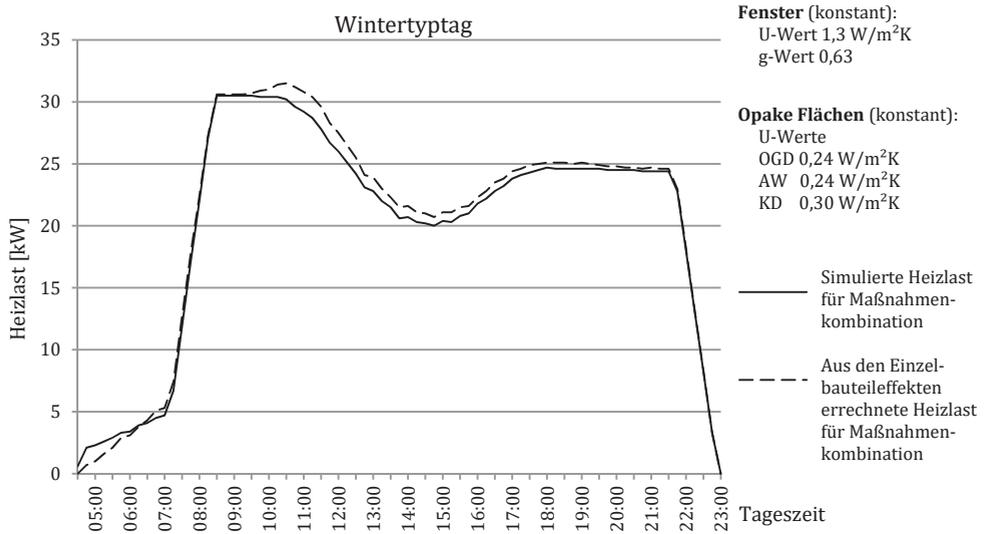
Zu erkennen ist die Absenkung der Heizlast in Abhängigkeit des Fenster-U-Wertes sowie die Auswirkung des Gesamtenergiedurchlassgrads (g-Wert) auf die solaren Wärmegewinne über die Tagesstunden. Aus diesen Lastwerten werden die Bedarfsprofilwerte  $lp$  für die Fensterprozesse (siehe Unterabschnitt 5.5.4.1 <sup>S. 135</sup>) durch Multiplikation mit Jahreszeitscheibendauer  $dr^{tsa}$  und eine Normierung auf den jährlichen Heizwärmebedarf des Gebäudes im Ausgangszustand gebildet.

Im zweiten Schritt wird der Dämmeffekt der einzelnen opaken Flächen – oberste Geschossdecke (OGD), Außenwand (AW) und Kellerdecke (KD) – separat für jede Fenstervariante untersucht. Abbildung 19 zeigt die Heizlastprofile für die zweifache Wärmeschutzverglasung jeweils in Kombination mit einer Dämmmaßnahme. Betrachtet wird die Anhebung des Dämmstandards der opaken Flächen vom Ausgangszustand auf das geforderte EnEV-Niveau. Die dadurch erreichte Reduktion der Heizlast wird mit Jahreszeitscheibendauer  $dr^{tsa}$  multipliziert und mit der entsprechenden U-Wert-Verringerung des entsprechenden Bauteils normiert. Diese Werte werden dem Parameter  $lp^{clad}$  zugewiesen und bilden das Heizwärme-Reduktionsprofil der einzelnen Dämmmaßnahmen (siehe Unterabschnitt 5.5.4.2 <sup>S. 136</sup>).



**Abbildung 19:** Heizlastverlauf am Wintertypstag für die Fenstervariante mit zweifacher Wärmeschutzverglasung in Abhängigkeit der Dämmung einzelner opaker Flächen der thermischen Gebäudehülle

Im dritten Schritt sind noch die Wechselwirkungen zwischen den opaken Einzelbauteildämmungen bei einer Kombination dieser Maßnahmen zu berücksichtigen. Abbildung 20 zeigt die Gegenüberstellung des durch Aggregation der Einzelbauteileffekte errechneten Heizlastverlaufs (basierend auf den eben ermittelten Werten für  $l_p$  und  $l_p^{clad}$ ) und dem simulierten Profilverlauf derselben Maßnahmenkombination.

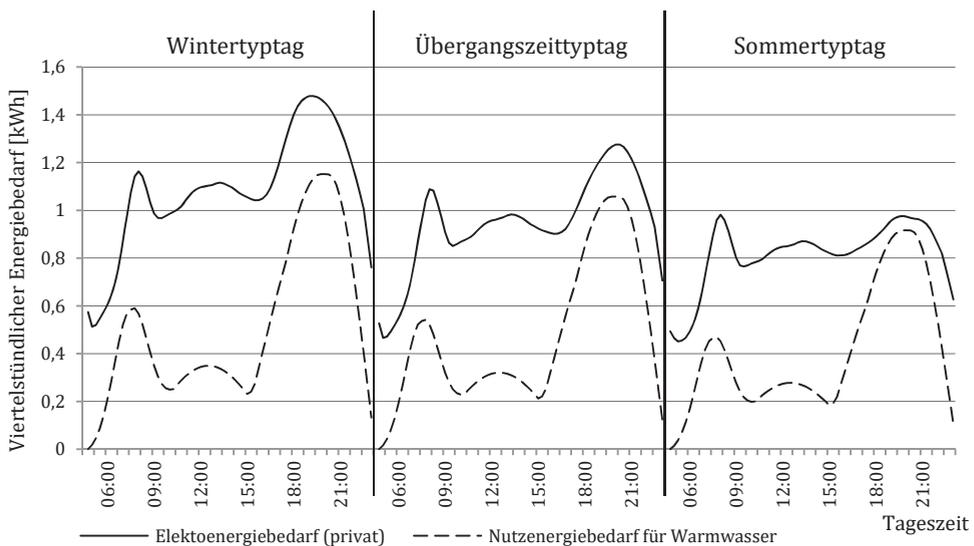


**Abbildung 20:** Gegenüberstellung des simulierten und des aus den Einzeleffekten errechneten Heizlastverlaufs für die Kombination von Wärmeschutzmaßnahmen

Für das betrachtete Gebäude ist festzustellen, dass sich die Einzeleinflüsse auf das Heizlastprofil durch die Dämmstandardänderung von oberster Geschossdecke und Kellerdecke kaum gegenseitig beeinflussen. Für diese Maßnahmenkombination entspricht das simulierte Heizlastprofil dem errechneten Summenprofil aus den Einzeleffekten. Die in Abbildung 20 erkennbaren Abweichungen treten zutage, wenn der Dämmstandard der Außenwand als größte Hüllfläche zusammen mit dem Dämmstandard der obersten Geschossdecke und/oder der Kellerdecke angehoben wird. Für diese Maßnahmenkombinationen ist deshalb der Einzeleinfluss der Außenwand auf das Heizlastprofil zu korrigieren. Hierfür werden die Abweichungen der Profilverläufe in Abbildung 20 zunächst der obersten Geschossdecke und der Kellerdecke anteilig zugeordnet und – wiederum multipliziert mit der Jahreszeitscheibendauer  $dr^{tsa}$  – mit der entsprechenden U-Wert-Verringerung der obersten Geschossdecke bzw. der Kellerdecke normiert. Diese Werte bilden die Korrekturwerte  $l_{padj}^{clad}$  (siehe Unterabschnitt 5.5.4.2<sup>S. 136</sup>), welche dem Dämmprozess der Außenwand im Energieflussgraphen als Korrekturprofil zugewiesen werden.

Die mittleren Bedarfsprofile der Nutzerzone für elektrische Energie und Warmwasser sind in Abbildung 21 wiedergegeben. Die zeitliche Inanspruchnahme von Warmwasser ist für alle drei Typtage identisch. Die angenommene durchschnittliche Entnahme beträgt 27 Liter pro Person und Tag bei 55 °C Zapftemperatur. Die Abweichungen für den Warmwassernutzenergiebedarf zwischen den Typtagen begründen sich durch die unterschiedlichen Trinkwassertemperaturen am Hausanschluss. Für den Wintertypstag wird eine mittlere Zulufttemperatur von 6 °C unterstellt. Am Übergangstypstag bzw. am Sommertypstag beträgt das Temperaturniveau des Zulaufs 10 bzw. 16 °C (vgl. bspw. [118<sup>S.4</sup>]).

Die jährlichen Verluste der Warmwasserzirkulation belaufen sich im Ausgangszustand auf 34.700 kWh. Dieser Verlust kann durch die Dämmung der Zirkulationsleitungen auf 16.100 kWh gesenkt werden. Gleichzeitig verringert sich mit dieser Maßnahme die Heizwärmegutschrift für den Gebäudeausgangszustand von 18.900 auf 8.000 kWh pro Jahr.



**Abbildung 21:** Mittlere Bedarfsprofile der Nutzerzone für Elektroenergie und Warmwasser

Zur Berücksichtigung des Hilfsenergiebedarfs werden durchschnittliche Kennwerte für Hilfsantriebe, Pumpen und Regelung angesetzt [152]. Der sonstige allgemeine Elektroenergiebedarf des Gebäudes wird mit 2.000 kWh pro Jahr angenommen [64].

## 6.2.4 Anlageneinsatz und Energiebedarfsdeckung

Die grundlegende Forderung für das als Energieflussgraph abgebildete Gebäudeenergiesystem besteht darin, dass zu jedem Modellzeitpunkt der Energiebedarf vollständig durch die objektinternen Versorgungsanlagen bzw. den Energiebezug von externen Lieferanten gedeckt wird. Erfolgt die Systemanalyse auf Basis einer aggregierten unterjährigen Zustandsabbildung mit Typtagen und Zeitscheiben, können die Vorgaben jedoch nur Mittelwerte darstellen. Die Bedarfswerte der durch die Typtage repräsentierten realen Tage und Zeitpunkte werden nach oben und unten abweichen.

Der Mittelwertansatz im Sinne einer bilanziellen Betrachtung für größere Zeiträume ist weitgehend unproblematisch, wenn Mittelwertabweichungen zu einzelnen Zeitpunkten keine Auswirkung auf die jährlichen Ein- und Auszahlungen haben und der Anlageneinsatz lediglich von der Energienachfrage beeinflusst wird. Für einige der vorgegebenen Versorgungsanlagen ist dies jedoch nicht der Fall. Die Energiebereitstellung aus den Solaranlagen ist von der Verfügbarkeit bzw. der Intensität solarer Strahlungsenergie abhängig. Für die Bewertung der KWK- und der PV-Anlage ist relevant, welche Anteile der bereitgestellten Elektroenergie für Lieferungen an die Nutzer, für Hilfsenergien und zur Netzeinspeisung eingesetzt werden, da hieraus unterschiedliche Zahlungsvorgänge resultieren. In Abhängigkeit des Detailgrades der unterjährigen Modellzeitstruktur sind deshalb folgende drei Aspekte bei der Analyse des Anlageneinsatzes und der gebäudeinternen Energieverwendung zu berücksichtigen, welche sich gegenseitig überlagern und in Summe die Anlagenwirtschaftlichkeit maßgeblich beeinflussen.

Der erste Aspekt betrifft grundsätzlich das Energiebereitstellungspotenzial im Tagesverlauf. Im wärmegeführten Betrieb ist der Einsatz der KWK-Anlage an die Wärmenachfrage gebunden. Die Solaranlagen werden entsprechend der vorgegebenen Ausrichtung und Neigung der verfügbaren Dachfläche ihr größtes Energiebereitstellungspotenzial vorrangig über die Mittagsstunden erreichen.

Der zweite Aspekt adressiert nutzer- und wetterbedingte Mittelwertabweichungen zu einzelnen Zeitpunkten. Auf der Bedarfsseite begründen sie sich durch das variierende Verhalten der Gebäudenutzer bei der Energieinanspruchnahme. Insbesondere bei der Nutzung von Elektroenergie ist in der Regel eine hohe Fluktuation zu verzeichnen, sodass die realen Nachfragewerte in der Regel deutlich von den Mittelwerten abweichen werden. Auf der Bereitstellungsseite unterliegen vor allem die Erträge aus den Solaranlagen kurzfristig wetterbedingten Schwankungen. Durch den Einsatz von Energiespeichern wird die Relevanz dieses Aspektes allerdings abgeschwächt.

Der dritte Aspekt betrachtet saisonale und witterungsbedingte Abhängigkeiten der Energienachfrage und -bereitstellung, also die Mittelwertabweichungen innerhalb der

durch die einzelnen Typtage vertretenen Zeiträume eines Jahres. Tendenziell steigt der potenzielle Energieertrag der Solaranlagen mit zunehmender Nähe zum Sommer hin an, während sich der Wärme- und Elektroenergiebedarf gleichzeitig verringert.

Bei der Energiesystemmodellierung wird der erste Aspekt grob durch die Vorgabe von Mittelwertprofilen für die einzelnen Typtage berücksichtigt. Der Einsatz der KWK-Anlage ist grundsätzlich durch die im vorangegangenen Abschnitt vorgestellten Wärmebedarfsprofile für Warmwasser und Heizen beschränkt. In Abhängigkeit des Wärmespeichervolumens kann hier kurzfristig eine gewisse Einsatzflexibilität erreicht werden. Für die PV- und die Solarthermie-Anlage wird zunächst ein bezüglich der Anlagengröße normiertes Energiebereitstellungsprofil entsprechend der Ausrichtung und Neigung der verfügbaren Dachfläche sowie des durchschnittlich erreichbaren Energieertragspotenzials für jeden einzelnen Typtag vorgegeben. Zur Normierung der solaren Energiebereitstellungsprofile wird der mittlere jährliche Energieertrag der PV-Anlage mit  $950 \text{ kWh/kW}_p$  angenommen [242]. Die Solarthermieanlage soll bezogen auf die Bruttokollektorfläche und unter Berücksichtigung der Systemverluste bis zur Einspeicherung ein jährliches Energiebereitstellungspotenzial von  $550 \text{ kWh/m}^2$  aufweisen. Der nutzbare Energieertrag aus dieser Anlage ergibt sich allerdings erst durch die Modellentscheidung zur Kollektorflächen- und Wärmespeichergröße sowie zum Anlageneinsatz zur Wassererwärmung und gegebenenfalls zur Heizungsunterstützung.

Unter den gegebenen Rahmenbedingungen zur Vergütung bzw. zum Verkauf der erzeugten Elektroenergie (siehe Abschnitte 6.2.5 und 6.2.6) steigt die ökonomische Vorteilhaftigkeit der stromerzeugenden Anlagen mit zunehmendem Anteil der objektintern genutzten Elektroenergie. Gleiches gilt für die solarthermische Anlage hinsichtlich des nutzbaren Anteils an ihrem gesamten Energiebereitstellungspotenzial im Jahresverlauf. Erfolgt die Anlageneinsatzanalyse auf Basis der gewählten Modellzeitstruktur mit lediglich drei Typtagen und den entsprechenden Mittelwertprofilen für Energiebereitstellung und -bedarf, würde dies zu einer deutlichen Überschätzung des wirtschaftlichen Potenzials dieser Anlagen führen. Der Grund ist darin zu sehen, dass die oben genannten Aspekte zwei und drei der Anlageneinsatzbewertung nicht ausreichend erfasst sind.

Um eine Annäherung an die realen Einsatzmöglichkeiten dieser Systemoptionen zu erreichen, sind deshalb zusätzliche Festlegungen zu treffen. In Abhängigkeit des angestrebten Deckungsgrads der Energiebedarfsmittelwerte der Zeitscheiben wird für die stromerzeugenden Anlagen gleichzeitig eine Mindesteinspeiserate ins Versorgungsnetz gefordert. Dieser Vorgehensweise liegt folgender Gedanke zugrunde: Bei steigendem Eigenversorgungsanteil sind zunehmend reale Nachfragerwerte zu befriedigen, die über dem jeweiligen Bedarfsmittelwert liegen. Dementsprechend ist das

Energiebereitstellungspotenzial der Anlage auch zunehmend größer auszulegen als es zur Deckung des Mittelwerts erforderlich wäre. Gleichzeitig verringert sich der notwendige Zukauf von extern bereitgestellter Elektroenergie während ein zunehmender Anteil der intern erzeugten Elektroenergie ins Netz einzuspeisen ist. Letzteres begründet sich durch die größer werdende Anzahl realer Nachfragewerte, die unterhalb des Energiebereitstellungspotenzials der Anlagen liegen. Äquivalent ist die Vorgehensweise zur Energieertragsbeschränkung der solarthermischen Anlage. Hier erhöht sich mit steigender Wärmebedarfsdeckungsrate allerdings die Stillstandszeit der Anlage und der Anteil des nutzbaren Energieertrags an der potenziellen Energiebereitstellung wird zunehmend reduziert.

Die Berücksichtigung dieser Gegebenheiten ist vor allem für den Übergangstyptag relevant, welcher mit insgesamt 224 Realtagen den größten Zeitraum eines Jahres repräsentiert. In Tabelle 10 sind die angenommen Korrekturwerte für diesen Typtag zum Einsatz der KWK- und PV-Anlage zur Deckung des Elektroenergiebedarfs der Gebäudenutzer sowie der Solarthermieanlage zur Wärmebedarfsdeckung angeführt.

**Tabelle 10:** Korrekturwerte zum Energiebereitstellungspotenzial der KWK-Anlage und der Solaranlagen für den Übergangstag<sup>128</sup>

Deckungsanteil- bereiche an den Energie- bedarfsmittelwerten der einzelnen Zeitscheiben	Mindesteinspeiseanteil der bereitgestellten Energie zur Deckung des Elektroenergiebedarfs der Gebäudenutzer aus:		Nicht nutzbarer Anteil des Energiebereitstellungspotenzials der Solarthermieanlage bei Deckung des Wärmeenergiebedarfs für:	
	KWK-Anlage	PV-Anlage	Warmwasser	Heizung
≤ 10 %	0 %	20 %	0 %	25 %
> 10 % und ≤ 30 %	40 %	80 %		
> 30 % und ≤ 40 %	60 %		80 %	10 %
> 40 % und ≤ 60 %		> 90 %		50 %
> 60 %	> 90 %		> 85 %	

Entsprechende Vorgaben werden auch für den Sommer- und den Wintertyp tag definiert. Diese repräsentieren allerdings wesentlich kürzere und im Vergleich zum Übergangstyp tag relativ homogene Zeiträume des Jahres, sodass saisonale und witterungsbedingte Mittelwertabweichungen weniger stark ins Gewicht fallen.

<sup>128</sup> Die Korrekturwerte der einzelnen Deckungsbereiche bauen aufeinander auf.

## 6.2.5 Energiepreise

In den Fallstudien werden mit Ausnahme für den Betrieb einer Wärmepumpe nur saison- und tageszeitunabhängige Tarife für elektrische Energie und Gas betrachtet. Tabelle 11 gibt einen Überblick zu der angenommenen Preisstruktur für den Energiebezug von externen Lieferanten. Für den Betrieb der Wärmepumpe werden neben dem Strombezug zum Standardtarif zwei weitere Tarifoptionen vorgegeben. Diese können jedoch nur zum Einsatz kommen, wenn die Wärmeversorgung auch bei einer Unterbrechung des Strombezugs für die Wärmepumpe von dem externen Energie-lieferanten innerhalb der angegebenen Sperrzeiten sichergestellt ist.

Die angenommene jährliche Preissteigerungsrate für den Gasbezug orientiert sich in den Basisszenarien an der Gaspreisentwicklung für Haushalte der letzten Jahre. Zur Fortschreibung des Strompreises wird dagegen eine geringere Steigerungsrate angenommen, als in der jüngeren Vergangenheit zu verzeichnen war. Maßgeblichen Einfluss auf den deutlichen Preisanstieg der letzten Jahre hatten Umlagen zur Subventionierung von EE-Technologien. Durch die EEG-Reform 2014 wird versucht, dieser Entwicklung entgegenzuwirken. Die vorgesehene Variation der Preissteigerungsraten für die Sensitivitätsszenarien ist ebenfalls Tabelle 11 zu entnehmen.

**Tabelle 11:** Preise für den Energiebezug von externen Lieferanten<sup>129</sup>

Energiebezugspreise für 2015 (brutto, inklusive aller Umlagen und Steuern)		jährliche Steigerungsrate				
		EP--	EP-	Basis	EP+	EP++
Gas	6,6 ct/kWh	1,5 %	2,0 %	2,5 %	3,0 %	3,5 %
Strom Standardtarif	26,0 ct/kWh					
Sondertarif 1 für Wärmepumpenstrom (WP-Strom ST 1) mit möglichen Sperrzeiten von: 10:00 – 11:00 Uhr 13:00 – 14:00 Uhr 19:00 – 20:00 Uhr	06:00 – 21:00 Uhr: 23,9 ct/kWh 21:00 – 06:00 Uhr: 19,5 ct/kWh	2,2 %	2,5 %	2,8 %	3,1 %	3,4 %
Sondertarif 2 für Wärmepumpenstrom (WP-Strom ST 2) mit möglichen Sperrzeiten von: 09:00 – 10:00 Uhr 12:00 – 14:00 Uhr 17:00 – 19:00 Uhr	06:00 – 21:00 Uhr: 22,7 ct/kWh 21:00 – 06:00 Uhr: 18,3 ct/kWh					

<sup>129</sup> In Anlehnung an [265–267].

## 6.2.6 Rahmenbedingungen der Anlagenbewirtschaftung

Falls eine KWK- oder PV-Anlage installiert wird, ist diese vollständig dem Betreiber als Unternehmer zugeordnet. In der Eigennutzerfallstudie betreiben die Eigentümer die Anlagen gemeinsam. Die relevanten Rahmendaten für die Bewirtschaftung der Anlagen sind in Tabelle 12 zusammengefasst. Die objektexterne Stromlieferung aus einer KWK-Anlage erfolgt an den Betreiber der vorgelagerten Netzebene. PV-Strom-Einspeisungen werden auf Grundlage der geförderten Direktvermarktung vorgenommen und über einen entsprechenden Dienstleister abgewickelt.

Für die Stromlieferung an die Mieter wird in der Vermieterfallstudie von zwei denkbaren Vertragskonstellationen ausgegangen (siehe auch Abschnitt 5.6.5<sup>S. 154</sup>). Zu einem Preis von 23 ct/kWh kann ein Liefervertrag mit der Hälfte der Mieterparteien zustande kommen. Zu einem Preis von 20 ct/kWh wären dagegen alle Bewohner daran interessiert, sich vom Vermieter mit elektrischer Energie versorgen zu lassen. Strommengen, die den objektinternen Abnehmern nicht aus der KWK-/PV-Anlage bereitgestellt werden können, bezieht der Anlagenbetreiber von einem externen Lieferanten zu dem in Tabelle 11 angegebenen Standardtarif.

**Tabelle 12:** Rahmendaten für die Bewirtschaftung von KWK- und PV-Anlagen<sup>130</sup>

Werte für 2015		jährliche Steigerungsrate				
		EP--	EP-	Basis	EP+	EP++
KWK-Zuschlag (für 10 Jahre)	5,41 ct/kWh	-				
Einspeisevergütung KWK (netto, Ø EPEX-Baseload-Quartalpreis und vermiedene Netznutzungsentgelte)	3,79 ct/kWh	2,0 %	3,0 %	4,0 %	5,0 %	6,0 %
Geförderte Direktvermarktung für PV-Strom (netto, für 20 Jahre)	12,84 ct/kWh (≤ 10 kW <sub>p</sub> )	-				
	12,5 ct/kWh (> 10 kW <sub>p</sub> )					
Preise für objektinterne Stromversorgung Dritter (brutto, inkl. EEG-Umlagen)	23,0 ct/kWh (6 Mieter)	entsprechend Strompreisentwicklung in Tabelle 11				
	20,0 ct/kWh (alle Mieter)					
EEG-Umlage (bei Stromeigennutzung > 10 MWh/a bzw. aus Anlagen > 10 kW <sub>e</sub> sind davon abzuführen: 30% ab 2015, 35% ab 2016, 40% ab 2017)	6,17 ct/kWh	4,0 %	3,5 %	3,0 %	2,5 %	2,0 %
Gasbezugspreis für KWK-Anlagen (netto, ohne Energiesteuer)	4,9 ct/kWh	entsprechend Gaspreisentwicklung in Tabelle 11				

Die Berücksichtigung der EEG-Umlage bei der Stromeigennutzung entspricht den Regelungen des EEG 2014. Unterhalb der angegebenen Bagatellgrenzen fällt keine EEG-Umlage an. Für die Sensitivitätsszenarien zur Energiepreisentwicklung ist zu

<sup>130</sup> Vgl. KWKG 2012, EEG 2014 und in Anlehnung an [1/2/86/193/266/267].

beachten, dass die EEG-Umlage bei niedrigeren EPEX-Baseload-Preisen tendenziell höher ausfallen sollte und umgekehrt, da den Anlagenbetreibern im Rahmen der geförderten Vermarktung unabhängig von der Entwicklung der Großhandelspreise eine Mindestvergütung zugesichert ist. Zu erwarten ist, dass die EEG-Umlage bis 2025 ihren Scheitelpunkt erreicht haben und danach fallen sollte [208]. Für den Analysezeitraum wird dennoch eine konstante jährliche Zuwachsrate unterstellt. Diese pessimistische Sichtweise soll dazu dienen, das wirtschaftliche Potenzial der Stromerzeugungsanlagen etwas zu dämpfen, um die Unsicherheiten hinsichtlich der Entwicklungen der EEG-Umlage und des zu zahlenden Anteils für die Eigenstromnutzung (nach 2017 als konstant angenommenen) zu berücksichtigen.

Die Stromerzeugungsanlagen werden vollständig unternehmerisch betrieben. Als Bemessungsgrundlage zur steuerlichen Berücksichtigung von Privatentnahmen in der Eigennutzerfallstudie werden für den KWK-Strom die dadurch entgangenen Einzahlungen aus der Netzeinspeisung herangezogen. Aus Vereinfachungsgründen soll dies auch für die Eigenstromversorgung aus der PV-Anlage gelten. Für die KWK-Wärme werden dagegen die Selbstkosten inklusive Energiebezug, Instandhaltung sowie anteiliger AfA betrachtet. Davon werden den Gebäudenutzern in der Vermieterfallstudie lediglich die umlagefähigen Kostenanteile in Rechnung gestellt. Die mögliche Stromversorgung der Mieter zur Deckung ihres privaten Bedarfs wird hinsichtlich der Umsatzbesteuerung generell als eigenständige Hauptleistung gesehen.

## 6.2.7 Rahmenbedingungen der Vermietung

Das Mietpreisniveau der Bestandsmieter 2014 beträgt 6,10 €/m<sup>2</sup> monatlich. Alle Wohneinheiten sind vermietet. Die letzte Mietsteigerung liegt bereits drei Jahre zurück. Für den Gebäudestandort existiert ein Mietspiegel, der als Mietpreiskriterium den Primärenergiebedarf des Gebäudes betrachtet. Die entsprechenden Vergleichsmietpreise sind in Tabelle 13 angeführt.

**Tabelle 13:** Vergleichsmietpreise am Gebäudestandort und Leerstandzeiten

Vergleichsmietpreise für 2015 und erwartete mittlere Leerstandzeiten beim Mieterwechsel		jährliche Steigerungsrate				
		MP--	MP-	Basis	MP+	MP++
Gebäudeausgangszustand Leerstandzeit: 3 Monate	6,30 €/m <sup>2</sup>	0,5 %	0,75 %	1,0 %	1,25 %	1,5 %
Primärenergiebedarf ≤ 150 kWh/m <sup>2</sup> a Leerstandzeit: 3 Monate	6,43 €/m <sup>2</sup>					
Primärenergiebedarf ≤ 100 kWh/m <sup>2</sup> a Leerstandzeit: 2 Monate	6,62 €/m <sup>2</sup>					
Primärenergiebedarf ≤ 50 kWh/m <sup>2</sup> a Leerstandzeit: 1 Monat	6,74 €/m <sup>2</sup>					

Für die Mietpreisentwicklung wird in den Basisszenarien von einem konsolidierten Mietmarkt am Gebäudestandort ausgegangen [113<sup>S.74</sup>]. Mit den Sensitivitätsszenarien wird untersucht, welchen Einfluss eine schwächere bzw. dynamischere Vergleichsmietpreisentwicklung auf die Modellergebnisse hat. Es ist davon auszugehen, dass durchschnittlich alle zwei Jahre ein Mieterwechsel erfolgt, wobei für den Gebäudeausgangszustand im Mittel mit drei Monaten Leerstand zu rechnen ist. Es wird unterstellt, dass diese Leerstanddauer durch eine energetische Modernisierung des Gebäudes verringert werden kann. Die Leerstandkosten werden pauschal mit 1.300 Euro pro Wohneinheit und Jahr angesetzt und beinhalten umlagefähige Kosten, welche für den Leerstandzeitraum vom Vermieter zu tragen sind. Für neue Mietverhältnisse ist der jeweils gültige Vergleichsmietpreis als Einstiegsmietpreis erreichbar. Die Bestandsmieten können innerhalb von drei Jahren um maximal 20 % gesteigert werden. Für die Dienstleistungen eines externen Verwalters werden zusätzlich ca. 4 % der Mieteinnahmen pro Jahr fällig.

Zur Bestimmung der Modernisierungsumlage für die Mieter werden die in Tabelle 14 angeführten Modernisierungsanteile herangezogen. Sie basieren auf Richtwerten aus der angegebenen Literatur und eigenen Annahmen. Letztere orientieren sich an den anrechenbaren zusätzlichen Anfangsauszahlungen gegenüber der alternativen Maßnahme mit den geringsten Anfangsauszahlungen. Um die finanziellen Auswirkungen aus dem recht hohen modernisierungsbedingten Mietsteigerungspotenzial für die Bestandsmieter im Umsetzungsjahr abzufedern, wird für alle Szenarien der Vermieterfallstudie zusätzlich die Festlegung getroffen, dass innerhalb von drei Jahren nach der Maßnahmenumsetzung eine Warmmietenneutralität erreicht sein soll.

**Tabelle 14:** Umlagefähige Modernisierungsanteile zum Umsetzungszeitpunkt<sup>131</sup>

Systemoption	Umlagefähiger Anteil an den Anfangsauszahlungen	
Gasbrennwertkessel	10 %	
Wasser-Wasser-Kompressionswärmepumpe	60 %	
KWK-Anlage Gasmotor	≤ 10 kW <sub>el</sub>	45 %
	> 10 kW <sub>el</sub>	40 %
Solarthermieanlage	100 %	
Warmwasserspeicher(-system)	monovalent	5 %
	bivalent	10 %
Heizpufferspeicher	100 %	
Dämmung Warmwasserzirkulation	50 %	
Dämmung oberste Geschossdecke und Kellerdecke	100 %	
Dämmung Außenwand	50 %	
Fernster Wärmeschutzverglasung	2-fach	10 %
	3-fach	20 %

<sup>131</sup> In Anlehnung an [28/91/203/251/264] und eigene Festlegungen.

## 6.2.8 Rahmenbedingungen der Finanzplanung

Am Anfang des Analysezeitraums stehen in beiden Fallstudien 100.000 € als Instandhaltungsrücklage an Eigenmitteln zur Verfügung, welche auch für Modernisierungsmaßnahmen eingesetzt werden können. Für die Vermieterfallstudie wird angenommen, dass für 2015 eine Entnahme von 30.000 € geplant ist. Im Folgezeitraum sollen die Entnahmen jährlich um 1,5 % steigen. Für die Eigennutzerfallstudie werden dagegen jährliche Mittelbereitstellungen in Höhe der laufenden Instandhaltungs- und Betriebsauszahlungen im Gebäudeausgangszustand und in Abhängigkeit der szenario-spezifischen Preisentwicklungen sowie eine Instandhaltungsrücklage von 500 € pro Jahr und Eigentümer in der Finanzplanung berücksichtigt. Der Steuersatz für alle Einkünfte beträgt einheitlich 42 %. Mit Ausnahme der KWK- und der PV-Anlage, welche über 10 bzw. 20 Jahre Nutzungsdauer abzuschreiben sind [41], können alle anderen Maßnahmen als Erhaltungsaufwand angesetzt werden. In allen Szenarien der beiden Fallstudien soll am Ende des Analysezeitraums erneut eine Instandhaltungsrücklage (liquide Mittel) von mindestens 100.000 € vorhanden sein.

Vom Ansatz einer umfassenden Vollkostenbetrachtung für das Gebäude wird insoweit abgewichen, als dass für die Modellentscheidung irrelevante jährlich anfallende Auszahlungen (bspw. Grundsteuer, Kaltwasserkosten, Energieverbrauchsmessung und -abrechnung etc.) nicht berücksichtigt sind. Gleiches gilt für Instandhaltungsauszahlungen, die keine der in die Analyse einbezogenen Anlagen und Bauteile betreffen. Für den Vermieter handelt es sich hierbei teilweise um umlagefähige Kosten. Die nicht umlagefähigen und für seine Einkommensteuer relevanten sonstigen Auszahlungen werden pauschal mit 1.000 € pro Jahr veranschlagt. Der Eigennutzer bestreitet solche Auszahlungen dagegen generell aus Einnahmequellen, die nicht im Finanzplan erfasst sind. Sonstige größere Instandsetzungen des Gemeinschaftseigentums, die aus der Rücklage zu finanzieren wären, sind für den Analysezeitraum nicht geplant. Zu Beginn des Analysezeitraums bestehen keine Kapitaldienstverpflichtungen für das Gebäude.

Zur langfristigen Fremdfinanzierung der Modernisierungsmaßnahmen können zum Umsetzungszeitpunkt Mittel aus den KfW-Förderprogrammen 151, 152 und 167 sowie für die Eigennutzerfallstudie zusätzlich aus dem Programm 430 genutzt werden. Darüber hinaus besteht die Möglichkeit, für die Installation einer PV-Anlage auf Finanzierungsmittel aus dem KfW-Programm 274 zurückzugreifen. Die wichtigsten Konditionen der einbezogen langfristigen Fremdfinanzierungsmöglichkeiten sind zusammen mit den vorgesehenen Zinssatzvariationen der Anschlussfinanzierung nach der angegebenen Zinsbindungsdauer in Tabelle 15 zusammengefasst. Daraus ergeben sich für die Vermieterfallstudie insgesamt 16 und für die Eigennutzerfallstudie insgesamt 22 Zuschuss- bzw. langfristige Darlehensvarianten der KfW, die für die Entscheidungsfindung betrachtet werden.

**Tabelle 15:** Langfristige Fremdfinanzierungsmöglichkeiten der KfW (Stand 2014)<sup>132</sup>

KfW-Programm	Effizienzhaus-Standard	Bewilligungsanforderungen  Q <sub>p</sub> und H <sub>r</sub> ' gegenüber Referenzgebäude	Konditionen				Zinssatz der Anschlussfinanzierung				
			Maximales Volumen pro Wohneinheit  [€]	Zuschussanteil an Darlehenssumme bzw. Investition  [%]	Laufzeit/tilgungsfrei/Zinsbindung  [a]	Zinssatz  [%]	ZS--  [%]	ZS-  [%]	Basis  [%]	ZS+  [%]	ZS++  [%]
151/152 Energieeffizient Sanieren (Darlehen)	ohne	Spezifische Anlagen- und Bauteilanforderungen (vgl. [161])	50.000	-	10 / 2 / 10 oder 20 / 3 / 10	1,00	3,0	4,0	5,0	6,0	7,0
	115	Q <sub>p</sub> ≤ 115% H <sub>r</sub> ' ≤ 130%	75.000	2,5							
	100	Q <sub>p</sub> ≤ 100% H <sub>r</sub> ' ≤ 115%		5,0							
	85	Q <sub>p</sub> ≤ 85% H <sub>r</sub> ' ≤ 100%		7,5							
	70	Q <sub>p</sub> ≤ 70% H <sub>r</sub> ' ≤ 85%		12,5							
	55	Q <sub>p</sub> ≤ 55% H <sub>r</sub> ' ≤ 70%		17,5							
167 Energieeffizient Sanieren (Darlehen)		Ergänzungsdarlehen bei Inanspruchnahme von BAFA-Zuschüssen ohne Erreichen eines KfW-Effizienzhausstandards [16/162]	50.000	-	10 / 2 / 10	1,51	-				
430 Energieeffizient Sanieren (Zuschuss)	ohne	Spezifische Anlagen- und Bauteilanforderungen (vgl. [161])	5.000	10,0	-	-	-				
	115	Q <sub>p</sub> ≤ 115% H <sub>r</sub> ' ≤ 130%	7.500	10,0							
	100	Q <sub>p</sub> ≤ 100% H <sub>r</sub> ' ≤ 115%	9.375	12,5							
	85	Q <sub>p</sub> ≤ 85% H <sub>r</sub> ' ≤ 100%	11.250	15,0							
	70	Q <sub>p</sub> ≤ 70% H <sub>r</sub> ' ≤ 85%	15.000	20,0							
	55	Q <sub>p</sub> ≤ 55% H <sub>r</sub> ' ≤ 70%	18.750	25,0							
274 Erneuerbare Energien (Darlehen)		Nur für die PV-Anlage (deren Finanzierung über die anderen KfW-Programme ausgeschlossen ist)	100% der Anfangsauszahlungen	-	5 / 1 / 5	1,26	-				
				-	10 / 2 / 10	1,56					
				-	20 / 3 / 20	2,55					

Neben der KfW-Förderung werden Investitionszuschüsse des BAFA für Solarthermie- und KWK-Anlagen in die Analyse einbezogen (siehe Tabelle 16).<sup>133</sup> Eine Kombination der BAFA- mit den KfW-Mitteln für einzelne Maßnahmen ist grundsätzlich möglich, sofern in Summe ein KfW-Effizienzhausstandard durch die Modernisierung erreicht

<sup>132</sup> Für weitere Informationen zu den einzelnen Programmen wird auf [158] verwiesen.

<sup>133</sup> Der BAFA-Zuschuss für Wärmepumpen bleibt unberücksichtigt, da mit den getroffenen Annahmen zu den Einsatzbedingungen der Anlage die Förderanforderungen nicht erfüllt werden.

wird. Im Fall der Durchführung von Einzelmaßnahmen ohne Erreichen eines definierten Standards können die BAFA-Zuschüsse jedoch nur mit Mitteln aus dem KfW-Programm 167 für ein und dieselbe Maßnahme in Anspruch genommen werden.

**Tabelle 16:** Einbezogene Investitionszuschüsse des BAFA (Stand 2014/15 [17])

Förderbereich	Anlagengröße	Investitionszuschuss
Innovationsförderung Solar (Warmwasserbereitung)	20 - 100 m <sup>2</sup> Bruttokollektorfläche	1.800 € + 90 €/m <sup>2</sup> (> 20 m <sup>2</sup> )
Innovationsförderung Solar (Warmwasserbereitung und Heizungsunterstützung)	20 - 100 m <sup>2</sup> Bruttokollektorfläche	3.600 € + 180 €/m <sup>2</sup> (> 20 m <sup>2</sup> )
Mini-KWK-Anlagen	< 1 kW <sub>el</sub>	1.900 €
	1 - 4 kW <sub>el</sub>	1.900 € + 300 €/kW <sub>el</sub> (> 1 kW <sub>el</sub> )
	4 - 10 kW <sub>el</sub>	2.800 € + 100 €/kW <sub>el</sub> (> 4 kW <sub>el</sub> )
	10 - 20 kW <sub>el</sub>	3.400 € + 10 €/kW <sub>el</sub> (> 10 kW <sub>el</sub> )

Hinsichtlich der Finanzierungsmöglichkeiten der Modernisierungsmaßnahmen und der daraus resultierenden Konsequenzen werden folgende weitere, teilweise vereinfachende Festlegungen für die Fallstudienanalysen getroffen:

- Auf eine Differenzierung der Zinssätze nach der Höhe der Darlehenssumme wird verzichtet. Es wird unterstellt, dass die Investoren eine ausgezeichnete Bonität aufweisen und damit unabhängig von der werthaltigen Besicherung der Preisklasse A zugeordnet werden können.<sup>134</sup> Darüber hinaus wird für die Eigennutzerstudie kein, für die Vermieterstudie dagegen ein 30-prozentiger Mindestfinanzierungsanteil aus Eigenmitteln gefordert.
- Möglichkeiten zur Sondertilgung bleiben generell unberücksichtigt. In diesem Zusammenhang werden die Tilgungszuschüsse im KfW-Programm 151 auch nicht als geförderte Sondertilgung nach Abschluss der Maßnahmen sondern als prozentualer Investitionszuschuss an der Darlehenssumme behandelt, welcher den eigentlichen Darlehensanfangsbetrag direkt reduziert und nicht bei der Bestimmung der Kapitaldienststrategie erfasst wird. Durch diese Vereinfachung wird die Tilgung dieser Darlehen etwas unterschätzt und die Zinszahlung entsprechend leicht überschätzt. Diese Abweichungen werden im Rahmen der Fallstudien allerdings als vertretbar angesehen und sollten keinen maßgeblichen Einfluss auf die Entscheidungsfindung haben.

<sup>134</sup> Im Moment (Stand November 2014) bestehen für die einbezogenen Finanzierungsmöglichkeiten Zinsunterschiede in Abhängigkeit der KfW-Preisklassen [159] ohnehin nur für das KfW-Programm 274.

- Zur Bestimmung der bei einer Mietpreiserhöhung zu berücksichtigenden Zinsverbilligung wird entsprechend der aktuell sehr niedrigen Zinsen für vergleichbare erstrangige Hypotheken mit zehnjähriger Laufzeit ein Zinssatz von 1,7 % und für eine Laufzeit von 20 Jahren ein Zinssatz von 2,2 % angenommen [31].
- Da über das KfW-Programm 167 keine KWK-Anlagen gefördert werden, wird für diese Modernisierungsoption angenommen, dass neben dem BAFA-Zuschuss ein zusätzlicher Kredit zur Fremdfinanzierung herangezogen werden kann (im Folgenden KWK-Ergänzungskredit genannt). Es wird unterstellt, dass dieser Ergänzungskredit dieselben Konditionen (Laufzeit, Zinssatz, tilgungsfreie Anfangszeit) wie ein Kredit des KfW-Programms 167 aufweist.

Die anzusetzenden Konditionen für die kurz- und langfristigen Ergänzungsinvestitionen sind davon abhängig, welche Möglichkeiten von dem Investor zur alternativen Eigenmittelverwendung in Erwägung gezogen werden. Sie spiegeln gleichzeitig seine Mindestrenditeerwartung für den Eigenkapitaleinsatz wider. Tabelle 17 zeigt die unterstellten Verzinsungsanforderungen in den einzelnen Szenarien.

**Tabelle 17:** Zinssätze für die kurzfristige und die langfristige Ergänzungsinvestition sowie die kurzfristige Ergänzungsfinanzierung

Fallstudie	Position	Vorgabe maximales Volumen	Zinssatz 2015	Jährliche Verzinsung im letzten Jahr des Analysezeitraums				
				ZS--	ZS-	Basis	ZS+	ZS++
Eigennutzer	Kurzfristige Ergänzungsinvestition	unbeschränkt	1,5 %	2,0 %	2,5 %	3,0 %	3,5 %	4,0 %
	Langfristige Ergänzungsinvestition	unbeschränkt	3,0 %					
	Kurzfristige Ergänzungsfinanzierung	keine	-	-				
Vermieter	Kurzfristige Ergänzungsinvestition	unbeschränkt	2,5 %	3,0 %	3,25 %	3,5 %	3,75 %	4,0 %
	Langfristige Ergänzungsinvestition	unbeschränkt	6,0 %					
	Kurzfristige Ergänzungsfinanzierung	20.000 [€/a]	4,0 %	6,0 %	7,0 %	8,0 %	9,0 %	10,0 %

Für die Eigennutzer sind die Verzinsungsansprüche an aktuelle Zinssätze für Festgeldanlagen mit entsprechenden Laufzeiten angelehnt (Stand 2014 [281]). Die Zielrenditen eines Gebäudebewirtschafters werden dagegen höher angesetzt [217<sup>s. 26</sup>]. Sie orientieren sich an der durchschnittlichen Verzinsung offener (kurzfristige Anlage) und geschlossener (langfristige Anlage) Immobilienfonds [32/240]. In beiden Fallstudien wird von einem zukünftig steigenden Zinsniveau ausgegangen.

Für die in Tabelle 17 angeführten Anlagezinssätze erfolgt im Analysezeitraum vereinfacht eine lineare Anpassung zwischen den Vorgabewerten des ersten und des letzten Jahres. Der Verzinsungsanspruch der langfristigen Kapitalanlage erreicht vom Ausgangswert für 2015 bis zum Analysehorizont entsprechend der kürzer werdenden Laufzeiten den Zinssatz der kurzfristigen Kapitalanlage im letzten Modelljahr.

Wie in Tabelle 17 erkennbar, werden hinsichtlich der kurzfristigen Ergänzungsfinanzierung ebenfalls unterschiedliche Festlegungen für die beiden Fallstudien getroffen. Für die Vermieterfallstudie wird zur kurzfristigen Ergänzungsfinanzierung die Möglichkeit zur Aufnahme eines Kredits mit einjähriger Laufzeit vorgegeben. Dagegen soll im Eigennutzerfall die Aufnahme eines zusätzlichen kurzfristigen Kredits bzw. die Möglichkeit zur Erhebung von Sonderumlagen nicht von vornherein in die langfristige Planung einbezogen werden.

## **6.3 Ergebnisse der modellgestützten Fallstudienanalyse**

Im Folgenden werden die Ergebnisse der Modellanwendung für die beiden Fallstudien vorgestellt und interpretiert. Betrachtet werden zunächst die Modellentscheidungen zu den Basisszenarien. Im Anschluss daran erfolgt im Unterkapitel 6.4<sup>s. 199</sup> eine Untersuchung der Auswirkungen einer Variation unsicherer Eingangsparameter auf die Handlungsempfehlungen der Szenarien mit geplanter Instandsetzung (Szenarien INST). Die Ergebnisse der Basisszenarien werden im Unterkapitel 7.2<sup>s. 216</sup> erneut aufgegriffen und zusammenfassend gegenübergestellt, um daraus Schlussfolgerungen für das betrachtete Gebäude abzuleiten. Zur Unterstützung der Ergebnisinterpretation werden vereinzelt zusätzliche Modellläufe vorgenommen. Die Erkenntnisse daraus fließen an entsprechender Stelle in die Auswertung mit ein. Die Finanzpläne zu den Basisszenarien sind im Anhang (Tabelle 20 bis Tabelle 27) dargestellt. Zur Szenariodefinition siehe Unterkapitel 6.1<sup>s. 165</sup>.

### **6.3.1 Fallstudie „Eigennutzer“ – Ergebnisse der Basisszenarien**

Für die drei Basisszenarien der Eigennutzerfallstudie sind die empfohlenen Modernisierungsmaßnahmen und deren anfängliche Finanzierungsstruktur in Tabelle 18 dargestellt. Zum Vergleich ist auch der Endwert der Unterlassungsalternative (keine Durchführung von Maßnahmen zum Umsetzungszeitpunkt) mit angegeben.

**Tabelle 18:** Ergebnisse der Basisszenarien für die Fallstudie „Eigennutzer“

Analysefall und energetische Gebäudekennwerte nach Maßnahmenumsetzung <sup>135</sup>	Maßnahmen zum Umsetzungszeitpunkt	Anfangsfinanzierung der Maßnahmen	Endwert (davon liquide Mittel)
<b>E_FREI</b> (ohne geplante Instandsetzung) $q_p$ 135,6 kWh/m <sup>2</sup> a $H_{Tr}$ 1,0 W/m <sup>2</sup> K	<u>Ausbau:</u> Gaskessel, Warmwasserspeicher  <u>Installation:</u> Gasbrennwertkessel 55 kW KWK-Anlage 2,5 kW <sub>el</sub> Warmwasserspeicher 400 l PV-Anlage 16,7 kW <sub>p</sub>  <u>Dämmung:</u> Kellerdecke 0,20 W/m <sup>2</sup> K Warmwasserzirkulation nach EnEV	Anfangsauszahlungen 92,7 Tsd. € Eigenmitteleinsatz (35 %) 32,6 Tsd. € Fremdmiteileinsatz (65 %) 60,1 Tsd. €  <u>Investitionszuschüsse:</u> KfW-Progr. 430 3,6 Tsd. € BAFA-Mini-KWK 2,4 Tsd. €  <u>Darlehen 10 Jahre Laufzeit:</u> KWK-Ergänzungskredit 19,7 Tsd. €  <u>Darlehen 20 Jahre Laufzeit:</u> KfW-Progr. 274 34,4 Tsd. €	403 Tsd. € (366 Tsd. €)
<b>E_INST</b> (mit geplanter Instandsetzung) $q_p$ 75,8 kWh/m <sup>2</sup> a $H_{Tr}$ 0,36 W/m <sup>2</sup> K	<u>Ausbau:</u> Gaskessel, Warmwasserspeicher, Fenster  <u>Installation:</u> Gasbrennwertkessel 30 kW KWK-Anlage 2,5 kW <sub>el</sub> Warmwasserspeicher 400 l PV-Anlage 16,7 kW <sub>p</sub>  <u>Dämmung:</u> oberste Geschossdecke 0,24 W/m <sup>2</sup> K Außenwand 0,18 W/m <sup>2</sup> K Kellerdecke 0,20 W/m <sup>2</sup> K Warmwasserzirkulation nach EnEV  <u>Fenster neu:</u> 2-fache WSchVergl. 1,30 W/m <sup>2</sup> K	Anfangsauszahlungen 261,2 Tsd. € Eigenmitteleinsatz (29 %) 76,0 Tsd. € Fremdmiteileinsatz (71 %) 185,2 Tsd. €  <u>Investitionszuschüsse:</u> BAFA-Mini-KWK 2,4 Tsd. €  <u>Darlehen 10 Jahre Laufzeit:</u> KfW-Progr. 152 130,0 Tsd. € KWK-Ergänzungskredit 18,4 Tsd. €  <u>Darlehen 20 Jahre Laufzeit:</u> KfW-Progr. 274 34,4 Tsd. €	360 Tsd. € (251 Tsd. €)
<b>E_MPEB</b> (minimaler Primärenergiebedarf) $q_p$ 37,2 kWh/m <sup>2</sup> a $H_{Tr}$ 0,28 W/m <sup>2</sup> K	<u>Ausbau:</u> Gaskessel, Warmwasserspeicher, Fenster  <u>Installation:</u> W/W-Wärmepumpe 25 kW Solarkollektor 22,5 m <sup>2</sup> Warmwasserspeicher insg. 1350 l PV-Anlage 13,9 kW <sub>p</sub>  <u>Dämmung:</u> oberste Geschossdecke 0,10 W/m <sup>2</sup> K Außenwand 0,18 W/m <sup>2</sup> K Kellerdecke 0,20 W/m <sup>2</sup> K Warmwasserzirkulation nach EnEV  <u>Fenster neu:</u> 3-fache WSchVergl. 0,80 W/m <sup>2</sup> K	Anfangsauszahlungen 294,7 Tsd. € Eigenmitteleinsatz (0 %) 0,0 Tsd. € Fremdmiteileinsatz (100 %) 294,7 Tsd. €  <u>Zuschüsse:</u> BAFA-Solar-Innovation 2,0 Tsd. € KfW-Tilgungszuschuss 33,0 Tsd. €  <u>Darlehen 20 Jahre Laufzeit:</u> KfW-Progr. 274 28,7 Tsd. € KfW-Progr. 151 (EH 70) 264,0 Tsd. €	284 Tsd. € (155 Tsd. €)
<b>E_Unterlassung</b> $q_p$ 173,3 kWh/m <sup>2</sup> a $H_{Tr}$ 1,11 W/m <sup>2</sup> K			284 Tsd. € (261 Tsd. €)

<sup>135</sup> Die in den Modellrechnungen verwendeten Primärenergiefaktoren sind der DIN V 18599-1 entnommen, wobei die Festlegungen im Anhang 1 der EnEV 2014 Berücksichtigung finden. Die primärenergetische Bewertung der KWK-Anlage ist an das Verfahren B im Abschnitt 5.1.7 der DIN V 18599-9 angelehnt.

### 6.3.1.1 Basisszenario E\_FREI (ohne geplante Instandsetzung)

Dieses Basisszenario soll den maximal erreichbaren Endwert für die Gebäudeeigentümer unter den getroffenen Annahmen aufzeigen und eine Einschätzung ermöglichen, inwiefern Modernisierungsmaßnahmen dazu beitragen können. Annahm gemäß bleibt der ordnungsrechtliche Rahmen der EnEV dabei außen vor, sodass sich der Handlungsspielraum um rechtlich unzulässige Maßnahmenbündel erweitert. Jedoch zeigt sich, dass dieser Freiheitsgrad ungenutzt bleibt.

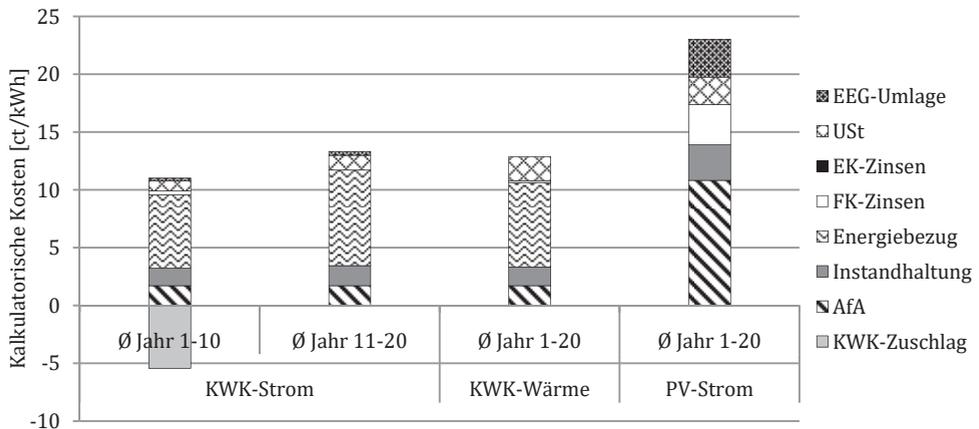
Das vorgeschlagene Maßnahmenbündel umfasst den sofortigen Ersatz des bestehenden Wärmeerzeugers durch eine Kombination aus Brennwertkessel und einer kleinen KWK-Anlage als Grundlastherzeuger. Ebenso sollte die Dämmung der Warmwasserzirkulation und der Austausch des Warmwasserspeichers in Angriff genommen werden. Die Maßnahmen an den Flächen der thermischen Hülle beschränken sich auf die Dämmung der Kellerdecke. Dämmmaßnahmen an der Außenwand im Zusammenhang mit dem Ersatz der Bestandsfenster sind dagegen kein Teil der Handlungsempfehlung.

Vor allem die nach der Maßnahmenumsetzung verringerten Wärmeverluste der Warmwasserzirkulation aber auch die leicht reduzierte Heizlast erlauben, den Warmwasserspeicher gegenüber dem Systemausgangszustand deutlich kleiner auszulegen. Hierin ist der wesentliche Grund für die Empfehlung zum Ersatz des vorhandenen Speichers zu sehen. Die geringeren Wärmeverluste des neuen Speichers fallen bei dieser Entscheidung dagegen kaum ins Gewicht.

Auch die KWK-Anlage hat wegen ihrer vergleichsweise geringen Leistung keinen maßgeblichen Einfluss auf die Größenauslegung des Warmwasserspeichers. Sie erreicht unter den gegebenen Bedingungen eine sehr hohe Auslastung von über 6.400 Vollaststunden pro Jahr. Mit ca. 10.900 kWh können knapp 68 % der erzeugten Elektroenergie objektintern genutzt werden. Ein Modelllauf ohne Einsatz von KWK zeigt, dass sich die Austauschempfehlung des bestehenden Wärmeerzeugers nicht allein durch die Vorteilhaftigkeit der KWK-Anlage begründet. Auch in diesem Fall wäre ein sofortiger Ersatz durch einen Brennwertkessels angeraten. Die Ursache ist vor allem in dem vergleichsweise geringen Nutzungsgrad des Bestandskessels zu sehen, welcher hier mit 82 % angesetzt wird.

Neben den wärmebedarfsrelevanten Maßnahmen ist auch die Installation einer PV-Anlage Teil der Handlungsempfehlung. Hierfür wird die gesamte verfügbare Dachfläche genutzt. Der mittlere jährliche PV-Stromertrag beträgt annähernd 15.900 kWh. Davon werden unter den getroffenen Annahmen ca. 28 % objektintern genutzt. Durch den Betrieb der beiden stromerzeugenden Anlagen sind die Gebäudenutzer in der Lage, in etwa 40 % ihres privaten und mehr als 85 % des allgemeinen Strombedarfs zu decken. Rund 18.200 kWh werden in Summe weiterhin von einem externen Liefe-

ranten bezogen. Aufgrund der Anlagengröße kann die Bagatellregelung zur EEG-Umlagebefreiung für den Strom aus der PV-Anlage nicht angewandt werden. Die zulässige Höchstmenge der umlagebefreiten Eigenstromnutzung wird jedoch durch die KWK-Anlage vollständig ausgeschöpft. Die mittleren kalkulatorischen Kosten der Eigenversorgung aus den stromerzeugenden Anlagen betragen für den PV-Strom 23 ct/kWh, für die KWK-Wärme 12,9 ct/kWh sowie für den KWK-Strom 5,6 ct/kWh innerhalb des zehnjährigen Zuschlagzeitraums bzw. 13,3 ct/kWh danach.<sup>136</sup> Die Zusammensetzung der Kosten ist in Abbildung 22 dargestellt.



**Abbildung 22:** Zusammensetzung der mittleren kalkulatorischen Kosten der Eigenversorgung durch die stromerzeugenden Anlagen für das Szenario E\_FREI

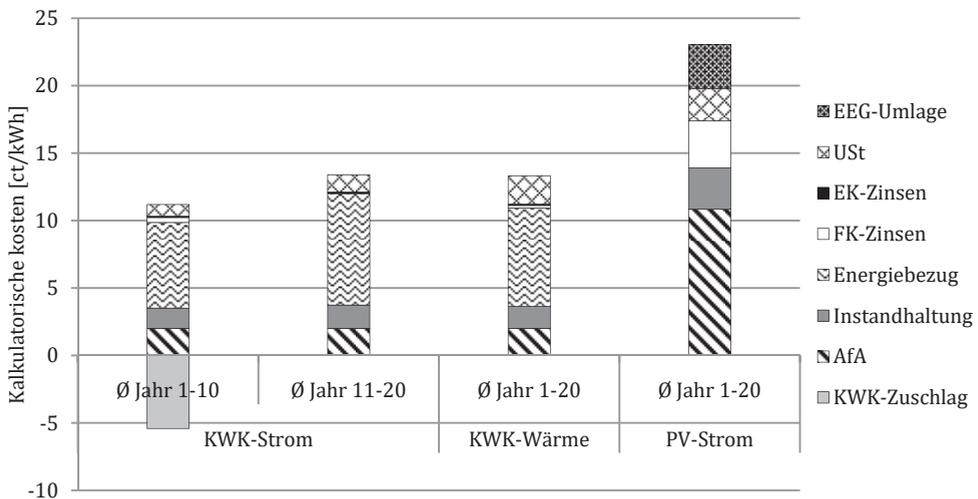
Durch die aus rein ökonomischer Sicht vorteilhaften Maßnahmen ohne geplante Instandsetzung wird in diesem Szenario eine Reduktion des Primärenergiebedarfs um annähernd 22 % gegenüber dem Ausgangszustand erreicht. Die Zugriffsmöglichkeiten auf staatliche Fördermittel sind dabei eingeschränkt. Für die KWK-Anlage wird der Investitionszuschuss des BAFA in Kombination mit dem angenommenen Ergänzungskredit genutzt. Die Anfangsauszahlung für die PV-Anlage wird vollständig über ein Darlehen aus dem KfW-Programm 274 finanziert. Die Umsetzung der restlichen Modernisierungsmaßnahmen wird im Wesentlichen aus Eigenmitteln bestritten. Lediglich ein kleiner Investitionszuschuss aus dem KfW-Programm 430 mit Beschränkung auf 10 % der Maßnahmenanfangsauszahlungen wird zusätzlich in Anspruch genommen.

<sup>136</sup> Ermittelt auf Grundlage einer linearen Abschreibung über den vorgegebenen Nutzungszeitraum inklusive KWK-Zuschlag, gegebenenfalls abzuführender EEG-Umlage und USt für die Privatentnahme.

### 6.3.1.2 Basisszenario E\_INST (mit geplanter Instandsetzung)

Für das zweite Basisszenario gilt die Annahme, dass die Instandsetzung bzw. Erneuerung der Wärmeversorgungsanlagen, der Fenster und der Außenwand zum betrachteten Umsetzungszeitpunkt erfolgen soll. Das im Zusammenhang mit diesen geplanten Arbeiten vorgeschlagene Modernisierungsmaßnahmenbündel umfasst neben der Dämmung der obersten Geschossdecke auch die Dämmung der Kellerdecke, der Außenwand und der Warmwasserzirkulation. Als Ersatzmaßnahme für die Bestandsfenster wird die zweifache Wärmeschutzverglasung gewählt. Ergebnis der Maßnahmenumsetzung ist eine Reduktion des Jahresheizwärmebedarfs um ca. 59.000 kWh.

Auch für dieses Szenario ist als Ersatz für den Hauptwärmeerzeuger eine Kombination aus Brennwertkessel und KWK-Anlage als vorteilhaft zu bewerten. Letztere erreicht bei gleicher Leistung mit knapp 5.600 Vollaststunden pro Jahr eine geringere Auslastung als im Szenario E\_FREI. Entsprechend liegen die mittleren kalkulatorischen Kosten der KWK-Eigenversorgung etwas höher. Sie betragen nun 13,3 ct/kWh für die Wärme und 5,8 ct/kWh für den Strom innerhalb des zehnjährigen Zuschlagzeitraums bzw. 13,4 ct/kWh im Folgezeitraum (siehe Abbildung 23).



**Abbildung 23:** Zusammensetzung der mittleren kalkulatorischen Kosten der Eigenversorgung durch die stromerzeugenden Anlagen für das Szenario E\_INST

Der geringfügige Eigenkapitaleinsatz zur Anlagenfinanzierung in diesem Szenario hat mit 0,1 ct/kWh keinen maßgeblichen Einfluss auf den Anstieg. Gleichzeitig wirkt der Wegfall der EEG-Umlage kostenreduzierend. Der objektintern nutzbare Stromertrag der Anlage errechnet sich zu 9.700 kWh/a. Die von der EEG-Umlage befreite

Höchstmenge für die Eigenstromnutzung wird damit immer noch fast vollständig ausgeschöpft. Zusammen mit der PV-Anlage, deren Installation ebenfalls wieder Teil der Handlungsempfehlung ist, fallen die internen Deckungsraten für den privaten bzw. den allgemeinen Strombedarf mit 38 % bzw. 77 % jedoch insgesamt etwas niedriger aus.

Durch die Maßnahmenumsetzung reduziert sich der Primärenergiebedarf des Gebäudes um nahezu 100 kWh/m<sup>2</sup>a. Der Referenzwert des vergleichbaren Neubaus wird dennoch um mehr als 40 % überschritten. Ein für die Maßnahmenfinanzierung relevanter KfW-Effizienzhausstandard wird somit auch in diesem Szenario nicht erreicht. Die Finanzierungsstruktur zur Anschaffung der KWK- und der PV-Anlage entspricht in etwa der des Szenarios E\_FREI. Die Anfangsauszahlungen für die anderen Maßnahmen werden zum überwiegenden Teil durch ein Darlehen mit zehnjähriger Laufzeit aus dem KfW-Programm 152 finanziert.

### 6.3.1.3 Basisszenario E\_MPEB (minimaler Primärenergiebedarf)

Mit dem letzten Basisszenario der Eigennutzerfallstudie wird unter der Bedingung, dass mindestens der Endwert der Unterlassungsalternative zu erreichen ist, die wirtschaftliche Grenze der größtmöglichen Primärenergiebedarfsreduktion für das betrachtete Gebäude ermittelt. Wie das Ergebnis der Modellrechnung zeigt, kann der Primärenergiebedarf unter dieser Prämisse deutlich gesenkt werden und beträgt mit rund 37 kWh/m<sup>2</sup>a nur noch 21 % des Bedarfs im Ausgangszustand. Die erforderlichen Maßnahmen hierfür beinhalten eine deutliche Anhebung des Dämmstandards der Gebäudehülle. Die Bestandsfenster werden durch Fenster mit einer dreifachen Wärmeschutzverglasung ersetzt.

Als Hauptwärmeerzeuger kommt die Wärmepumpe zum Einsatz. Trotz der verhältnismäßig gering angesetzten Nutzungsgrade und der wesentlich schlechteren primärenergetischen Bewertung des Energieträgers Strom, kann sich diese Anlage gegenüber Gas-Wärmeerzeugern durchsetzen. Ein Grund ist in der erreichbaren Endenergieeinsparung zu sehen. Diese wird hier tendenziell etwas unterschätzt, da zumindest für die Versorgung mit Heizwärme das Vorlauftemperaturniveau aufgrund der umfassenden Dämmmaßnahmen im Mittel reduziert werden kann. Der Gesamtnutzungsgrad der Anlage könnte somit höher ausfallen, als angenommen.

Ein zweiter wesentlicher Grund ist darin zu sehen, dass in der Zielfunktion der Primärenergiebedarf des gesamten Analysezeitraums erfasst wird. Dahin gehend hat auch die in der EnEV 2014 vorgesehene Senkung des anzusetzenden Primärenergiefaktors für Strom von 2,4 auf 1,8 ab dem zweiten Modelljahr einen erheblichen Einfluss auf die Entscheidungsfindung. Unter der Annahme, dass der Faktor 1,8 bis zum

Analysehorizont konstant bleibt, beträgt der errechnete mittlere Primärenergiebedarf rund  $28 \text{ kWh/m}^2\text{a}$ . Ergänzt wird die Wärmeversorgung durch eine Solarthermieanlage zur Warmwasserbereitung. Der erwartete Solarertrag fällt durch Stillstandszeiten mit rund  $510 \text{ kWh/m}^2\text{a}$  etwas kleiner aus, als das vorgegebene Energiebereitstellungspotenzial der Anlage. Knapp 40 % des Energiebedarfs zur Warmwasserversorgung inklusive der Zirkulationsverluste können hiermit gedeckt werden.

Betrachtet man die Finanzierungsstruktur wird deutlich, dass es sich hier um ein extremes Szenario handelt. Da in dieser Fallstudie annahmegemäß kein Eigenanteil gefordert ist, kann die Finanzierung hier vollständig über Fremdkapital erfolgen. Für die Inanspruchnahme der Fördermittel ist jedoch nicht der mittlere Primärenergiebedarf für den Analysezeitraum sondern der in Tabelle 18 angegebene Bedarfswert zum Umsetzungszeitpunkt maßgebend. Dieser erfüllt die Anforderungen des KfW-EH 70-Standards. Dementsprechend kann auf Mittel aus dem KfW-Programm 151 zugegriffen werden. Gewählt wird ein langfristiges Darlehen mit 20-jähriger Laufzeit, durch das sämtliche Maßnahmen mit Ausnahme der PV-Anlage finanziert werden. Aufgrund des erreichten Effizienzhausstandards ist hier für die Solarthermieanlage eine Kombination der KfW-Mittel mit dem Investitionszuschuss des BAFA zulässig.

### 6.3.2 Fallstudie „Vermieter“ – Ergebnisse der Basisszenarien

Für die Vermieterfallstudie zeigt Tabelle 19 eine Zusammenfassung der empfohlenen Modernisierungsmaßnahmen und Finanzierungsstrukturen für die drei untersuchten Basisszenarien. Im Unterschied zur Eigennutzerfallstudie wird für die Vermieterfallstudie grundsätzlich ein 30-prozentiger Mindesteigenmittelanteil zur Maßnahmenanfangsfinanzierung unterstellt.

#### 6.3.2.1 Basisszenario V\_FREI (ohne geplante Instandsetzung)

Mit dem ersten Basisszenario der Fallstudie wird zunächst wieder untersucht, welche Sofortmaßnahmen aus einem rein ökonomischen Beweggrund heraus für den Gebäudeeigentümer hinsichtlich einer Endwertmaximierung vorteilhaft sind. Zu empfehlen ist eine Erweiterung der bestehenden Wärmeversorgung um eine Wärmepumpe als Grundlastherzeuger, während der Bestandskessel weiterhin als Spitzenlastherzeuger genutzt wird. Der vorhandene Warmwasserspeicher wird durch einen bivalenten Speicher ersetzt, welcher im Zusammenhang mit der Dämmung der Warmwasserzirkulationsleitungen deutlich kleiner ausgelegt werden kann. Die Maßnahmen an der Gebäudehülle beschränken sich auf die Dämmung der Kellerdecke.

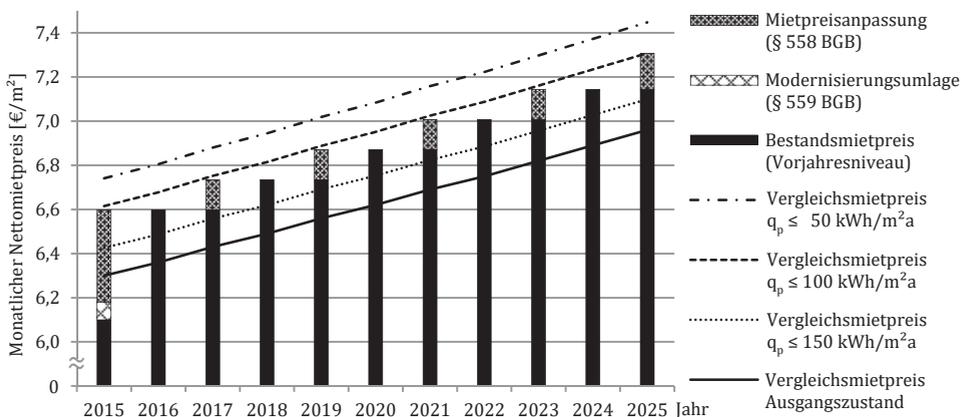
**Tabelle 19:** Ergebnisse der Basisszenarien für die Fallstudie „Vermieter“

<b>Analysefall</b> und energetische Gebäudekennwerte nach Maßnahmen- umsetzung <sup>137</sup>	<b>Maßnahmen</b> zum Umsetzungszeitpunkt	<b>Anfangsfinanzierung</b> der Maßnahmen	<b>Endwert</b> (davon liquide Mittel)
<b>V_FREI</b> (ohne geplante Instandsetzung) $q_p$ 100,0 kWh/m <sup>2</sup> a $H_{Tr}$ 1,0 W/m <sup>2</sup> K	<u>Ausbau:</u> Warmwasserspeicher  <u>Installation:</u> W/W-Wärmepumpe 23 kW Warmwasserspeicher 400 l  <u>Dämmung:</u> Kellerdecke 0,21 W/m <sup>2</sup> K Warmwasserzirkulation nach EnEV	Anfangsauszahlungen 49,4 Tsd. € Eigenmitteleinsatz (62 %) 30,5 Tsd. € Fremdmitteleinsatz (38 %) 18,9 Tsd. €  <u>Darlehen 20 Jahre Laufzeit:</u> KfW-Progr. 152 18,9 Tsd. €	334 Tsd. €  (295 Tsd. €)
<b>V_INST</b> (mit geplanter Instandsetzung) $q_p$ 50,0 kWh/m <sup>2</sup> a $H_{Tr}$ 0,36 W/m <sup>2</sup> K	<u>Ausbau:</u> Gaskessel, Warmwasserspeicher, Fenster  <u>Installation:</u> Gasbrennwertkessel 30 kW W/W-Wärmepumpe 8 kW Solarkollektor 12,5 m <sup>2</sup> Warmwasserspeicher 750 l  <u>Dämmung:</u> oberste Geschossdecke 0,24 W/m <sup>2</sup> K Außenwand 0,18 W/m <sup>2</sup> K Kellerdecke 0,20 W/m <sup>2</sup> K Warmwasserzirkulation nach EnEV  <u>Fenster neu:</u> 2-fache WSchVergl. 1,30 W/m <sup>2</sup> K	Anfangsauszahlungen 233,3 Tsd. € Eigenmitteleinsatz (30 %) 70,0 Tsd. € Fremdmitteleinsatz (70 %) 163,3 Tsd. €  <u>Zuschüsse:</u> KfW-Tilgungszuschuss 8,2 Tsd. €  <u>Darlehen 20 Jahre Laufzeit:</u> KfW-Progr. 151 (EH 100) 163,3 Tsd. €	318 Tsd. €  (210 Tsd. €)
<b>V_MPEB</b> (minimaler Primärenergie- bedarf) $q_p$ 42,3 kWh/m <sup>2</sup> a $H_{Tr}$ 0,29 W/m <sup>2</sup> K	<u>Ausbau:</u> Gaskessel, Warmwasserspeicher, Fenster  <u>Installation:</u> W/W-Wärmepumpe 28 kW Solarkollektor 20 m <sup>2</sup> Warmwasserspeicher insg. 1200 l  <u>Dämmung:</u> oberste Geschossdecke 0,15 W/m <sup>2</sup> K Außenwand 0,18 W/m <sup>2</sup> K Kellerdecke 0,20 W/m <sup>2</sup> K Warmwasserzirkulation nach EnEV  <u>Fenster neu:</u> 3-fache WSchVergl. 0,80 W/m <sup>2</sup> K	Anfangsauszahlungen 250,8 Tsd. € Eigenmitteleinsatz (30 %) 75,2 Tsd. € Fremdmitteleinsatz (70 %) 175,6 Tsd. €  <u>Zuschüsse:</u> BAFA-Solar-Innovation 1,8 Tsd. € KfW-Tilgungszuschuss 13,0 Tsd. €  <u>Darlehen 20 Jahre Laufzeit:</u> KfW-Progr. 151 (EH 85) 173,8 Tsd. €	311 Tsd. €  (195 Tsd. €)
<b>V_Unterlassung</b> $q_p$ 173,3 kWh/m <sup>2</sup> a $H_{Tr}$ 1,11 W/m <sup>2</sup> K			311 Tsd. €  (288 Tsd. €)

<sup>137</sup> Die in den Modellrechnungen verwendeten Primärenergiefaktoren sind der DIN V 18599-1 entnommen, wobei die Festlegungen im Anhang 1 der EnEV 2014 Berücksichtigung finden. Die primärenergetische Bewertung der KWK-Anlage ist an das Verfahren B im Abschnitt 5.1.7 der DIN V 18599-9 angelehnt.

Mit diesem Maßnahmenpaket kann der errechnete Primärenergiebedarf des Gebäudes auf  $100 \text{ kWh/m}^2$  jährlich gesenkt werden. Dies entspricht gerade dem oberen Anforderungswert für das dritte Vergleichsmietpreisniveau des vorgegebenen Miet spiegels (siehe Tabelle 13 <sup>s. 180</sup>). Auf Grundlage der §§ 559 und 559a BGB könnte für die umgesetzten Maßnahmen eine maximale Modernisierungumlage von monatlich rund  $35 \text{ ct/m}^2$  gegenüber den Bestandsmietern geltend gemacht werden. Allerdings besteht die zusätzliche Anforderung, dass für diese Mieter innerhalb von drei Jahren eine Warmmietenneutralität erreicht werden soll. Die durch die Maßnahmen erreichte mittlere Reduktion der umlagefähigen monatlichen Instandhaltungs- und Betriebskosten für diesen Zeitraum beträgt jedoch nur  $8,1 \text{ ct/m}^2$ . Auf diesen Wert wird die Modernisierungsumlage beschränkt. Die jährliche Umlage beträgt damit lediglich  $2,4 \%$  der anrechenbaren Modernisierungsauszahlungen.

Die geringe Modernisierungsumlage ist auch ausschlaggebend für die gewählte Mietpreisbildungsstrategie, welche für die Bestandsmieter in Abbildung 24 dargestellt ist. Auf die mögliche Vergleichsmietpreisanpassung von  $6,10$  auf  $6,30 \text{ €/m}^2$  vor der Maßnahmenumsetzung wird verzichtet, sondern es wird zunächst die Mietsteigerung im Sinne des § 559 BGB nach der Modernisierung geltend gemacht. Direkt im Anschluss erfolgt die Anpassung der Miete an das durch die Modernisierung erreichte neue Vergleichsmietpreisniveau nach § 558 BGB. Das Vergleichsmietpreisniveau von  $6,62 \text{ €}$  wird dabei nicht vollständig ausgeschöpft. Der errechnete monatliche Nettomietpreis für die Bestandsmieter liegt nach der Maßnahmenumsetzung mit  $6,60 \text{ €/m}^2$  jedoch nur geringfügig darunter. Ursache dafür ist die Inanspruchnahme eines kleinen zinsverbilligten Darlehens aus dem KfW-Programm 152 zur Maßnahmenanfangsfinanzierung. Bevorzugt wird eine Laufzeit von 20 Jahren.



**Abbildung 24:** Entwicklung des monatlichen Nettomietpreises der Bestandsmieter zum Umsetzungszeitpunkt für das Szenario V\_FREI

Die Mietpreissteigerung auf das erreichte ortsübliche Vergleichsmietpreisniveau kann erst nach dem 10-jährigen Förderzeitraum erfolgen. Die deutlich ansteigenden Zinsen der Anschlussfinanzierung nach der Bindungsfrist wirken sich aufgrund der steuerlichen Geltendmachung der Zinszahlungen weniger stark auf die Entscheidung zur Darlehenslaufzeit aus, als bei der Eigennutzerfallstudie. Dennoch wird der überwiegende Anteil der Maßnahmen durch Eigenmittel finanziert.

### 6.3.2.2 Basisszenario V\_INST (mit geplanter Instandsetzung)

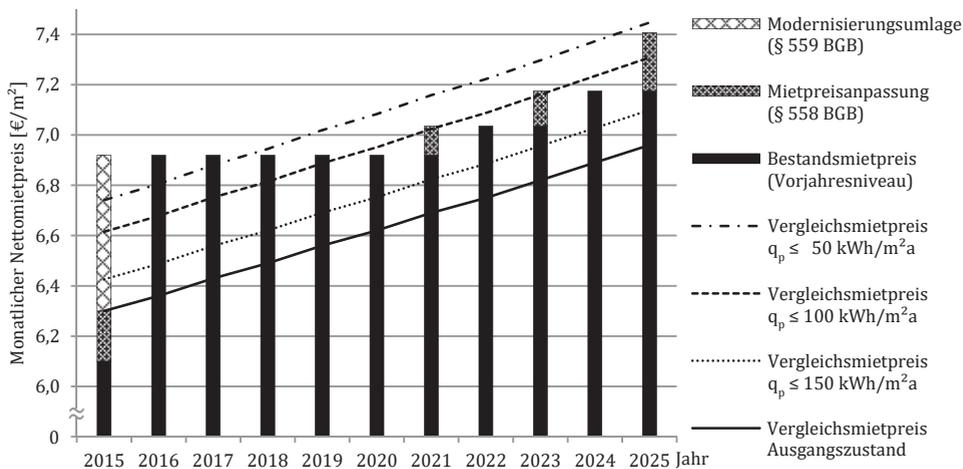
Im Zusammenhang mit geplanten Instandsetzungen zum Umsetzungszeitpunkt ist auch in der Vermieterfallstudie ein wesentlich umfangreicheres Modernisierungsmaßnahmenbündel zu empfehlen. Dieses beinhaltet Dämmmaßnahmen an allen Flächen der thermischen Gebäudehülle sowie für die Warmwasserzirkulation. Die bestehenden Fenster werden durch Fenster mit zweifacher Wärmeschutzverglasung ersetzt. Als Hauptwärmeerzeuger kommt ein Gas-Brennwertkessel zum Einsatz. Ergänzt wird das Wärmeversorgungssystem um eine Solarthermieanlage zur Wassererwärmung sowie um eine kleine Wärmepumpe.

Der jährliche Energieertrag der Solarthermieanlage beträgt  $550 \text{ kWh/m}^2$  unter Berücksichtigung der Systemverluste bis zur Wärmespeicherung. Damit können knapp 24 % des Energiebedarfs zur Warmwasserbereitstellung inklusive der Zirkulationsverluste gedeckt werden. Die Wärmepumpe dient überwiegend zur Warmwasserbereitung, leistet aber auch vorrangig in den Übergangszeiträumen ca. 30 % der Jahresheizwärmeversorgung. Für ihren Strombezug kann ein Liefervertrag mit möglicher Betriebsunterbrechung durch das EVU in Anspruch genommen werden. Gewählt wird die Sondertarifvariante 1 (siehe Tabelle 11 <sup>s. 178</sup>). Selbst bei vollständiger Inanspruchnahme der Sperrzeiten für die Wärmepumpe hätte der Brennwertkessel lediglich einen Anteil von ca. 3 % an der Warmwassererzeugung. Dieser Anteil wird in der Regel noch geringer ausfallen, da das EVU die Option zur Betriebssteuerung nur bei Bedarf in Anspruch nimmt und dieser Fall erfahrungsgemäß sehr selten eintritt. Die Systemauslegung ist aber darauf ausgerichtet, dass der Brennwertkessel die Warmwasserversorgung auch bei gegebenenfalls unzureichender Energiebereitstellung aus der Solarthermieanlage jederzeit problemlos sicherstellen kann.

Durch die Maßnahmenumsetzung reduziert sich der Primärenergiebedarf des Gebäudes auf  $50 \text{ kWh/m}^2\text{a}$ . Dies entspricht gerade dem oberen Anforderungswert für das vierte Vergleichsmietpreisniveau des angesetzten Mietspiegels (siehe Tabelle 13 <sup>s. 180</sup>). Der Referenzwert des vergleichbaren Neubaus wird damit knapp unterschritten. Für die Maßnahmenanfangsfinanzierung kann deshalb auf ein Darlehen aus dem KfW-Programm 151 mit Anforderungen an den EH 100-Standard zurückgegriffen werden.

Gewählt wird wiederum eine Darlehenslaufzeit von 20 Jahren. Der festgelegte maximale Fremdmittelanteil an der Maßnahmenanfangsfinanzierung wird dabei vollständig ausgereizt.

Durch die Modernisierung reduzieren sich die umlegbaren Instandhaltungs- und Betriebskosten für die Bestandsmieter innerhalb der ersten drei Jahre nach der Maßnahmenumsetzung im Mittel um  $62 \text{ ct/m}^2$  monatlich. Dieser Wert beschränkt wiederum die Modernisierungsumlage und entspricht einer jährlichen Umlage von ca. 6,2 % der anrechenbaren Anfangsauszahlungen. Ein Blick auf die Mietpreisentwicklung der Bestandsmieter zum Umsetzungszeitpunkt in Abbildung 25 zeigt, dass sich in diesem Szenario die Inanspruchnahme staatlicher Förderinstrumente wesentlich stärker auswirkt, als beim Szenario V\_FREI.



**Abbildung 25:** Entwicklung des monatlichen Nettomietpreises der Bestandsmieter zum Umsetzungszeitpunkt für das Szenario V\_INST

Im ersten Schritt erfolgt die mögliche Mietpreisanpassung an das ortsübliche Vergleichsniveau um  $20 \text{ ct/m}^2$ . Durch die Modernisierungsumlage wird nach der Maßnahmenumsetzung ein Mietpreis erreicht, der mit knapp 2,7 % leicht über dem neuen vergleichbaren Preisniveau liegt. Diese Überschreitung verhindert zunächst eine Mietpreiserhöhung in den Folgejahren. Erst im vierten Jahr nach der Modernisierung wird der Vergleichsmietpreis unterschritten. Allerdings ist eine Anpassung nach § 558 BGB zu diesem Zeitpunkt noch nicht möglich, da Fördermittel in Höhe von monatlich ca.  $12 \text{ ct/m}^2$  zu berücksichtigen sind. Erst im sechsten Jahr nach der Maßnahmenumsetzung wäre eine entsprechende Preisanpassung zulässig. Diese wird jedoch zugunsten einer höheren Steigerung bis zum Folgejahr verzögert, in welchem aufgrund der Sperrfrist eine erneute Anpassung sonst unzulässig wäre.

Auch nach der 10-jährigen Zinsförderperiode kann das Vergleichsmietpreisniveau noch nicht vollständig ausgeschöpft werden. Ursache hierfür ist der in Anspruch genommene KfW-Tilgungszuschuss, welcher in den Modellrechnungen mit jährlich 11 % über einen Zeitraum von 12 Jahren Berücksichtigung findet. Der anzusetzende Förderbetrag hierfür beläuft sich auf monatlich 4 ct/m<sup>2</sup>. Für die Bestandsmieter kann somit erst wieder im 13. Jahr nach der Maßnahmenumsetzung das ortsübliche Vergleichsmietpreisniveau erreicht werden.

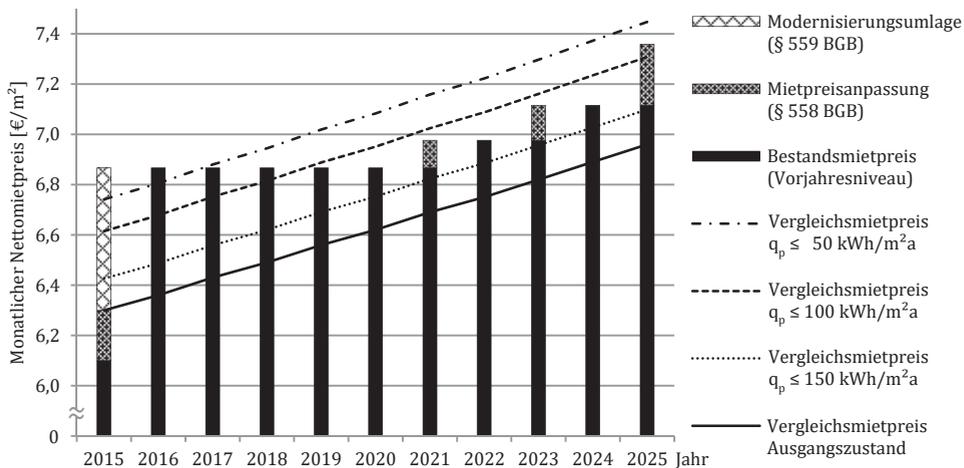
### 6.3.2.3 Basisszenario V\_MPEB (minimaler Primärenergiebedarf)

Mit der Zielsetzung zur Minimierung des Primärenergieeinsatzes kann in der Vermieterfallstudie unter den gegebenen Rahmenbedingungen nur noch eine kleine Bedarfsreduktion um 7,7 kWh/m<sup>2</sup>a gegenüber dem V\_INST-Szenario erreicht werden. Das Maßnahmenbündel umfasst den Ersatz der bestehenden Wärmeversorgungsanlagen durch eine Wärmepumpe, eine Solarthermieanlage und einen bivalenten Warmwasserspeicher. Zusätzlich wird vor allem der Dämmstandard der obersten Geschossdecke deutlich erhöht. Für die Fenster kommt die dreifache Wärmeschutzverglasung zum Einsatz. Der Solarthermieertrag beläuft sich auf jährlich 534 kWh/m<sup>2</sup> Bruttokollektorfläche und deckt ca. 37 % des Energiebedarfs zur Warmwasserbereitstellung inklusive der Zirkulationsverluste. Ein Sondertarif für den Wärmepumpenstrom kann wegen der fehlenden Redundanzanlage zur Sicherstellung der Wärmeversorgung während der möglichen Sperrzeiten allerdings nicht in Anspruch genommen werden.

Die gewählte Systemgestaltung zur Primärenergiebedarfsminimierung ist im Wesentlichen auf dieselben Gründe zurückzuführen, die schon bei der Ergebnisvorstellung zum Szenario E\_MPEB der Eigennutzerfallstudie im Unterabschnitt 6.3.1.3<sup>s. 191</sup> genannt sind. Die Forderungen zum Eigenmitteleinsatz, zu den jährlichen Entnahmen sowie zur Warmmietenneutralität der Bestandsmieter verhindern jedoch eine umfassendere Ausschöpfung des technischen Minderungspotenzials der vorgegebenen Systemgestaltungsoptionen. Allein die Aufhebung letzterer Prämisse würde bereits eine Primärenergiebedarfsreduktion auf rund 35 kWh/m<sup>2</sup>a ermöglichen. Allerdings wäre in diesem Fall für die Bestandsmieter vor der Maßnahmenumsetzung keine Warmmietenneutralität bis zum Analysehorizont erreichbar. Die Reduktion der umlegbaren Instandhaltungs- und Betriebskosten innerhalb der ersten drei Jahre des Betrachtungszeitraums fällt trotz des niedrigeren Primärenergiebedarfs mit durchschnittlich 57 ct/m<sup>2</sup> sogar etwas geringer aus, als im Szenario V\_INST. Ursache hierfür sind vor allem die höheren Energiebezugskosten. Zur Einhaltung der Warmmietenneutralitätsprämisse beträgt in diesem Szenario die Umlage der anrechenbaren Modernisierungsauszahlungen lediglich 5 % pro Jahr.

Die erreichte Verringerung des Primärenergiebedarfs erfüllt die Anforderungen des KfW-EH-Standards 85. Zur Maßnahmenanfangsfinanzierung wird auch ein Darlehen aus dem Programm 151 gewählt. Dieses wird ergänzt um den geforderten 30-prozentigen Mindesteinsatz an Eigenmitteln sowie um einen kleinen Investitionszuschuss des BAFA für die Solarthermieanlage. Letztere erreicht mit 20 m<sup>2</sup> Bruttokollektorfläche gerade die Untergrenze des von der Anlagegröße abhängigen Förderbereiches.

Die in Abbildung 26 dargestellte Mietpreissteigerungsstrategie für die Bestandsmieter am Beginn des Analysezeitraums gestaltet sich ähnlich zum Szenario V\_INST. Auch hier erfolgt zunächst die Mietpreisanpassung nach § 558 BGB um 20 ct/m<sup>2</sup> an das ortsübliche Vergleichsniveau vor der Maßnahmenumsetzung und die Erhöhung im Sinne des § 559 BGB im Anschluss daran. Bedingt durch die geringere Modernisierungsumlage zur Einhaltung der Warmmietenneutralität innerhalb des geforderten Bezugszeitraums wird bereits im dritten Jahr das ortsübliche Vergleichsmietpreisniveau nach der anfänglichen Preisüberhöhung zum Umsetzungszeitpunkt wieder unterschritten.



**Abbildung 26:** Entwicklung des monatlichen Nettomietpreises der Bestandsmieter zum Umsetzungszeitpunkt für das Szenario V\_MPEB

Die bei der Mietpreisbildung anzurechnenden Fördermittel betragen monatlich 9 ct/m<sup>2</sup> für die Zinsverbilligung und weitere 9 ct/m<sup>2</sup> für Tilgungs- und Investitionszuschüsse. Die nächste zulässige Möglichkeit zur Mietpreisanpassung nach § 558 ergibt sich somit auch in diesem Szenario erst im sechsten Jahr nach der Maßnahmenumsetzung. Die Anpassung wird wiederum zugunsten einer höheren Mietpreissteigerung um ein Jahr nach hinten verschoben.

## 6.4 Auswirkung einer Variation unsicherer Parameter

Die Ergebnisse der Modellanwendung in den vorangegangenen Abschnitten zeigen die vorteilhaftesten Handlungsempfehlungen für den bzw. die Eigentümer des betrachteten Gebäudes vor dem Hintergrund alternativer Eigentümer-Nutzer-Beziehungen, Instandsetzungsplanungen und Zielsetzungen. Ergänzend dazu werden in diesem Unterkapitel mithilfe weiterer Szenariorechnungen die Auswirkungen verschiedener Entwicklungspfade unsicherer Eingangsgrößen auf die Handlungsempfehlungen der Basisszenarien mit geplanter Instandsetzung (E\_INST und V\_INST) betrachtet. Im Rahmen einer klassischen Sensitivitätsanalyse dient eine solche Untersuchung zur Auslotung des Parametervariationsbereichs, in dem die Basislösung stabil bleibt bzw. zur Bestimmung der Einflussstärke einzelner Parameter auf die Zielgröße. Letztere erfolgt gegebenenfalls auch unter Inkaufnahme einer Basislösungsänderung und wäre in diesem Fall der parametrischen Optimierung zuzuordnen [204]. In der Regel wird hierfür jeweils eine einzelne Modelleingangsgröße in kleinen Schritten und oftmals unabhängig von der Realitätsnähe des Variationsbereichs modifiziert, wobei für jede Wertvorgabe ein separater Modelllauf erforderlich ist.

Der Fokus der folgenden Analyse mit verschiedenen Parameterentwicklungspfaden liegt weder auf der vollständigen Ermittlung des Robustheitsbereiches der Basislösung noch auf der alleinigen Beurteilung der Endwertänderung. Letztere wäre aufgrund der Bandbreite der erfassten Entscheidungsteilaspekte nur wenig aussagekräftig, sofern nicht auch die Auswirkungen auf die technische Systemgestaltung und die ökonomischen Handlungsempfehlungen beleuchtet werden. Des Weiteren ist eine kombinierte Betrachtung unsicherer Eingangsgrößen vorgesehen, um den Erkenntnisgewinn aus der Untersuchung zu erhöhen. Zur Beschränkung der hierfür erforderlichen Anzahl an Modellrechnungen werden allerdings nicht einzelne Parameter, sondern Parametergruppen für jeweils vier vom Basisszenario abweichende Entwicklungspfade modifiziert. Für das Szenario E\_INST erfolgt eine Variation des zukünftig erwarteten Energiepreisniveaus (EP--/-/+ /++) zusammen mit unterschiedlichen Zinssatzniveaus (ZS--/-/+ /++). Für das Szenario V\_INST wird dagegen das Zinssatzniveau in Verbindung mit der Vergleichsmietpreisentwicklung (MP--/-/+ /++) variiert.

Die gleichzeitige Änderung von mehreren Parametern erfolgt nicht nur zur Beschränkung der Szenarienzahl, sondern ist auch deshalb erforderlich, da eine unabhängige Entwicklung einiger Eingangsgrößen nicht gegeben ist. So wäre es bspw. wenig zweckmäßig, den Zinssatz der langfristigen Anschlussfinanzierung völlig unabhängig von der Zinssatzentwicklung der kurzfristigen Fremdfinanzierung und den Eigenkapitalanlagen zu untersuchen, da dadurch auch unsinnige bzw. stark realitätsferne Handlungsempfehlungen provoziert werden können.

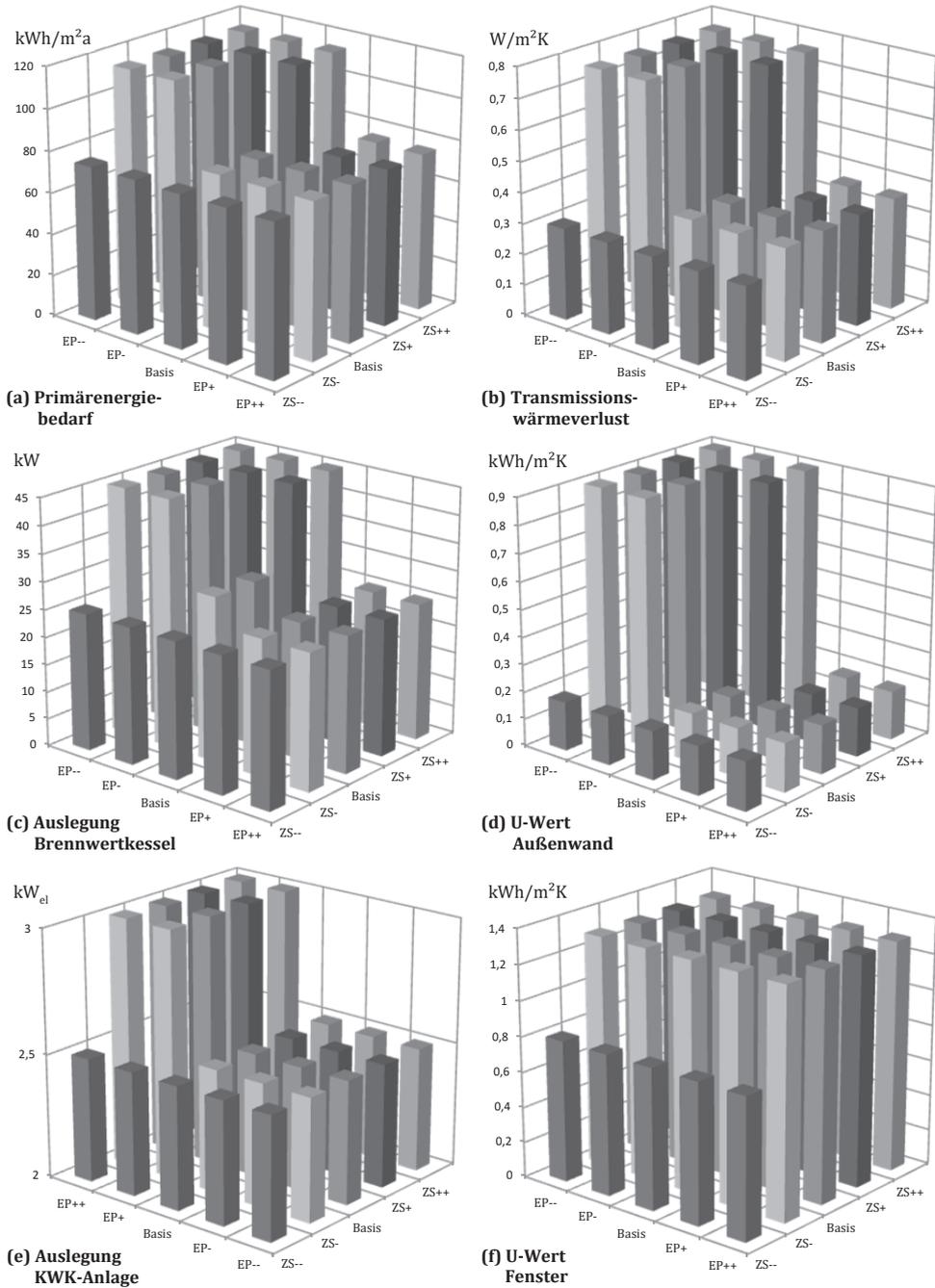
Mit diesen Festlegungen sind ergänzend zu den Basisszenarien in Summe 48 weitere Szenarien zu berechnen. Die vorgesehene Modifikation der jährlichen Entwicklungsraten für die betrachteten Eingangsgrößen sind in Tabelle 11 bis Tabelle 15 <sup>s. 178 ff.</sup> angeführt. Auch wenn mit dieser Vorgehensweise keine detaillierte Analyse des Stabilitätsbereiches der Basislösung möglich ist, können zumindest grobe Aussagen zu ihrer Robustheit und auch zur Einflussstärke der Parametergruppen auf die Zielgröße getroffen werden.

### **6.4.1 Variation der Energiepreis- und der Zinssatzentwicklung für das Basisszenario E\_INST**

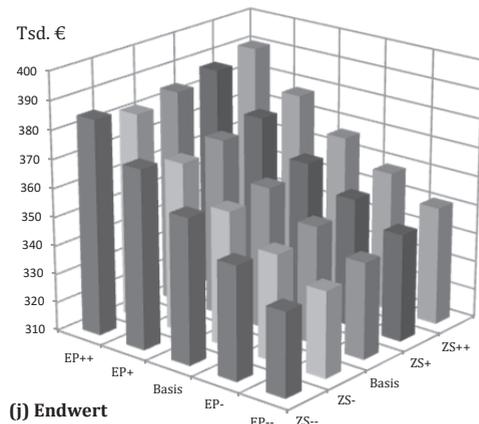
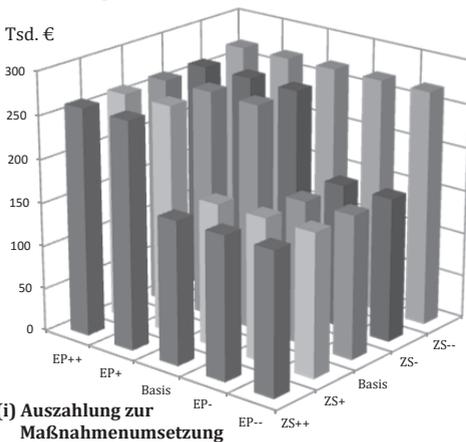
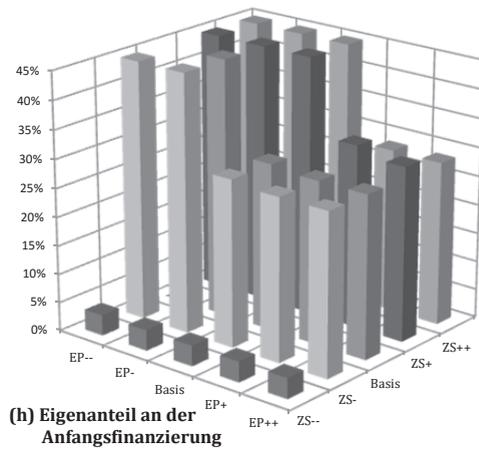
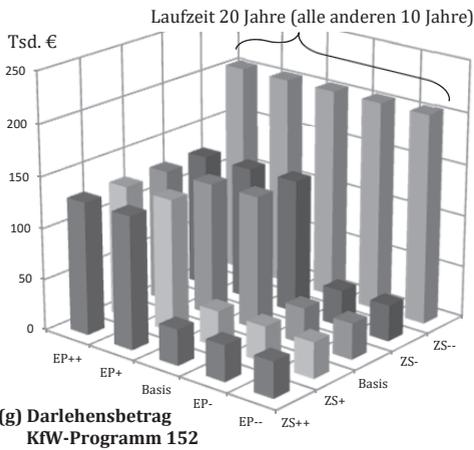
Eine Ergebnisauswahl der Untersuchung verschiedener zukünftiger Energiepreis- und Zinssatzniveaus für das Szenario E\_INST ist in den Diagrammen (a) bis (j) der Abbildung 27 dargestellt. Das Diagramm (a) zeigt zunächst die Auswirkungen der Parametervariation auf den erreichten Primärenergiebedarf des Gebäudes nach der Maßnahmenumsetzung. Der Bedarfswert bewegt sich im Mittel mit  $75 \text{ kWh/m}^2\text{a}$  bzw.  $114 \text{ kWh/m}^2\text{a}$  im Wesentlichen auf zwei Ebenen.

Ein Blick auf die Auswahl der Wärmeversorgungsanlagen zeigt zunächst, dass für alle Szenarien eine Kombination aus Brennwertkessel und einer kleinen KWK-Anlage vorgesehen ist. Der Primärenergiebedarf wird somit maßgeblich durch die Entscheidungen zur energetischen Gebäudehüllengestaltung und dem daraus resultierenden Nutzenergiebedarf beeinflusst. Während der Umfang der Dämmmaßnahmen an Keller- und oberster Geschossdecke gegenüber der Basislösung kaum variiert, ist die Außenwanddämmung trotz der unmittelbar vorgesehenen Instandsetzungsarbeiten nicht in allen Szenarien Teil der Handlungsempfehlung (d). Als größte Hüllfläche wirkt sich die Umsetzung dieser Maßnahme am stärksten auf den Transmissionswärmeverlust aus (b). Der errechnete Transmissionswärmeverlust weist auf dem niedrigsten Zinssatzniveau unabhängig von der Energiepreisentwicklung den geringsten Wert auf, da hier zusätzlich zur Außenwanddämmung die Fenster mit der dreifachen Wärmeschutzverglasung zum Einsatz kommen, während in allen andern Szenarien die Entscheidung zur zweifachen Wärmeschutzverglasung stabil bleibt (f).

Die KWK-Anlage wird nicht – wie vielleicht erwartet – mit der Zunahme des Nutzenergiebedarfs auch mit einer größeren Leistung ausgelegt (e). Eine sehr kleine Kapazitätserhöhung von lediglich  $0,5 \text{ kW}_{el}$  gegenüber der Basislösung erfolgt dafür bei den Szenarien mit höheren Energiepreiseniveaus und im Zusammenhang mit der Dämmung der Außenwand und dem Einsatz der zweifachen Wärmeschutzverglasung.



**Abbildung 27:** Ergebnisse verschiedener Energiepreis- und Zinssatzentwicklungen für das Szenario E\_INST (Hinweis: Zur besseren Erkennbarkeit variiert die Reihenfolge der Szenarien an den Achsen)



(Fortsetzung Abbildung 27)

Dieses Ergebnis ist einerseits mit der wirtschaftlichen Vorteilhaftigkeit umfangreicher Dämmmaßnahmen bei steigenden Preisen für die Wärmebereitstellung im Gebäude zu erklären. Andererseits wird aufgrund der ebenfalls ansteigenden Preise für den externen Strombezug in den Szenarien EP+ und EP++ auch die Eigenstromversorgung ökonomisch zunehmend attraktiver. Durch die größere Auslegung der KWK-Anlage kann ein höherer Eigendeckungsanteil am Strombedarf während der Betriebszeiten erreicht werden. Gleichzeitig verringert sich aber die Auslastung der Anlage in diesen Szenarien um knapp 600 Volllaststunden gegenüber dem Basisszenario.

In den Szenarien mit niedrigerem Energiepreisniveau ist die Installation der Außenwanddämmung aus rein wirtschaftlicher Sicht kein Bestandteil der vorteilhaftesten Handlungsweise. Der größere Wärmebedarf führt zu einer höheren Auslastung der KWK-Anlage. Damit steigt zunächst das ökonomische Potenzial dieser Technologie.

Gleichzeitig wird bei sinkenden Strombezugspreisen aber auch der KWK-Einsatz zunehmend unattraktiver, sodass in diesen Szenarien die Installation einer größeren Anlage zur weiteren Erhöhung des Eigenversorgungsanteils unterbleibt. Die Auslegung des Brennwertkessels als Spitzenlastversorger ist den Entscheidungen zur Installation der Außenwanddämmung und zum KWK-Anlageneinsatz eher untergeordnet (c). In Abhängigkeit des verbleibenden Anteils zur Deckung der Heizlast schwankt die Anlagenleistung zwischen 25 und 45 kW. Die Entscheidungen zur Auslegung des Warmwasserspeichers und zur Installation der PV-Anlage sind dagegen in allen Szenarien zur Handlungsempfehlung des Basisszenarios identisch.

Entsprechend der Systemgestaltung variiert das Volumen der Anfangsauszahlungen zur Maßnahmenumsetzung (i). Es nimmt erwartungsgemäß mit sinkenden Energiepreisen und steigenden Zinssätzen ab. Wie im Basisszenario werden neben dem KfW-PV-Anlagenkredit und dem Ergänzungsdarlehen zum BAFA-Investitionszuschuss für die KWK-Anlage Fremdmittel aus dem KfW-Programm 152 sowie Eigenmittel zur Maßnahmenfinanzierung herangezogen. Deutliche Unterschiede zeigen sich jedoch in der Finanzierungsstruktur.

Für das KfW-Darlehen 152 wird überwiegend eine 10-jährige Laufzeit mit Fixierung der niedrigen Zinssätze bevorzugt (g). Erst unterhalb eines Anschlussfinanzierungszinssatzes von 4 % erfolgt unabhängig vom Energiepreinsniveau der Übergang zur 20-jährigen Laufzeit (Szenarien ZS--). Für die anderen Szenarien mit 10-jähriger Laufzeit erhöht sich der Darlehensbetrag mit zunehmendem Energiepreinsniveau. Dies ist sowohl auf den größeren Maßnahmenumfang aber auch auf die zunehmende Energiekostenreduktion durch die Maßnahmen bei steigenden Energiepreisen zurückzuführen. Da die Energiekostenreduktion annahmegemäß zur Refinanzierung herangezogen werden kann, erhöht sich damit das Potenzial zur Deckung von Kapitaldiensten innerhalb des Analysezeitraums. Dies bestätigt auch ein Blick auf den Eigenmittelanteil an der Anfangsfinanzierung der Maßnahmen (h), welcher bei den niedrigeren Energiepreisniveaus tendenziell höher ausfällt. Da der Darlehensbetrag innerhalb der Zinsbindungsfrist vollständig getilgt wird, hat die Zinssatzvariation der Anschlussfinanzierung hier keinen Einfluss.

In Szenarien ZS-- dominiert dagegen das Zinssatzniveau der Anschlussfinanzierung die Entscheidungen zur Maßnahmenumsetzung und zur Anfangsfinanzierung. Hier wird sowohl die größte Anfangsauszahlung als auch der höchste Fremdfinanzierungsanteil erreicht. Zwar sinken die Energiekosten durch den Einsatz der dreifachen Wärmeschutzverglasung gegenüber den anderen Szenarien mit ähnlich hohem Dämmstandard der Gebäudehülle nur noch geringfügig, allerdings kann durch die niedrigeren Fremdkapitalzinsen und den längeren Tilgungszeitraum in Summe ein größeres Volumen an Kapitaldiensten gedeckt werden, ohne die Liquidität des

Eigentümers im betrachteten Bewertungsrahmen zu gefährden. Obwohl die Investition von Eigenmitteln in Modernisierungsmaßnahmen aufgrund der ebenfalls niedrigeren Verzinsung alternativer Kapitalanlagen an Attraktivität gewinnt, ist der Eigenkapitaleinsatz zur Sicherstellung der Anfangsfinanzierung in diesen Szenarien am geringsten. Auch diese Handlungsempfehlung lässt sich durch die längere Darlehenslaufzeit im Zusammenhang mit der deutlich geringeren Zinssatzdifferenz zwischen Anschlussfinanzierung und Eigenkapitalanlage nach dem 10-jährigen Zinsbindungszeitraum begründen. Der verstärkte Einsatz der erzielten Energiekosteneinsparung zur Deckung von Kapitaldiensten ist vorteilhafter, als die Reduktion der Kapitaldienste durch einen höheren Eigenmitteleinsatz zur Maßnahmenanfangsfinanzierung und der damit verbundene Verzicht auf die Erträge aus langfristigen Kapitalanlagen.

Vor dem Hintergrund der eben beleuchteten Teilaspekte der Modernisierungsentscheidung ist es nun möglich, die Endwertentwicklung im Rahmen der Parametervariation zu interpretieren. Die ermittelten Endwerte liegen zwischen rund 340.000 € für das Szenario EP--/ZS-- und 390.000 € für das Szenario EP++/ZS++ (j). Während der Endwert zwischen den Szenarien ZS- und ZS++ auf allen Energiepreisniveaus kontinuierlich wächst, kann zwischen ZS-- und ZS- eine geringfügige Verringerung des Endwertes festgestellt werden. Dies ist vor allem auf die günstigen Fremdfinanzierungsmöglichkeiten auf dem niedrigsten Zinssatzniveau zurückzuführen, welche eine deutliche Reduktion der laufenden Auszahlungen durch umfangreiche Modernisierungen bei besonders niedrigem Eigenkapitaleinsatz erlauben. Mit steigenden Energiepreisen erhöht sich die Energiekostenreduktion, sodass dieser Effekt von EP-- nach EP++ zwar immer noch klein ist, aber zunehmend stärker hervortritt.

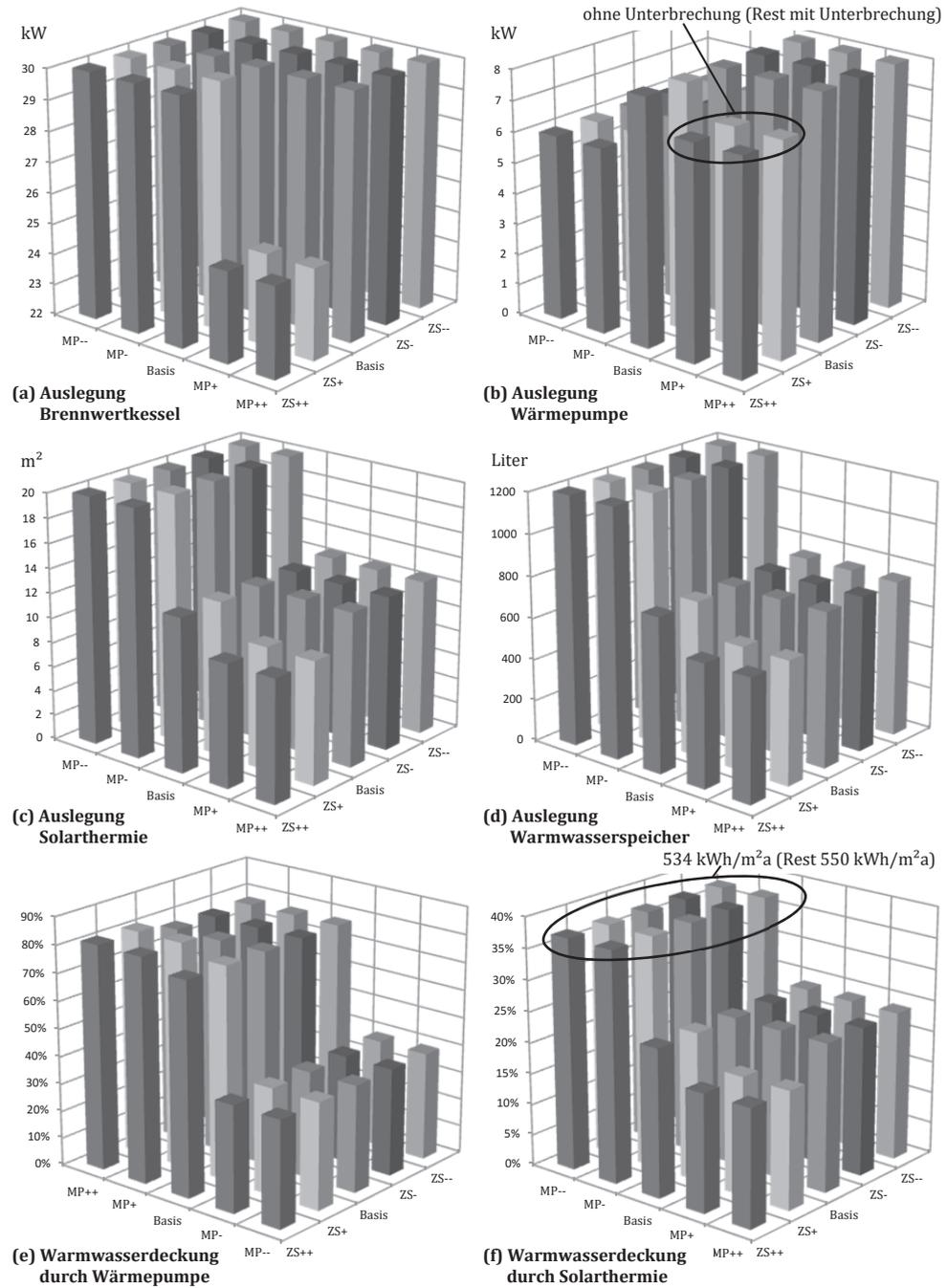
Der Endwertanstieg zwischen ZS- und ZS++ in den beiden Szenarien mit den niedrigsten Energiepreisen begründet sich ausschließlich durch die zunehmenden Erträge aus den Kapitalanlagen. Maßnahmenumfang und Finanzierungsstruktur ändern sich hier nicht. Die Zinssatzentwicklung der Anschlussfinanzierung hat außerhalb von ZS-- generell keinen Einfluss, da nur Darlehen mit Zinsbindung über den gesamten Tilgungszeitraum genutzt werden. Mit steigenden Energiepreisen werden umfangreichere Modernisierungsmaßnahmen auch aus ökonomischer Sicht attraktiver. Auf der Ebene des Basisenergiepreisniveaus verhindert die höhere Eigenkapitalverzinsung in den Szenarien ZS++ und ZS+ zunächst noch die Umsetzung der Außenwanddämmung. Unterhalb von ZS+ ist es dagegen vorteilhafter, zusätzliche Fremdmittel aufzunehmen und einen größeren Anteil der Energiekostenreduktion zur Deckung von Kapitaldiensten anstatt für Kapitalanlagen einzusetzen. Dieser Trend setzt sich auf den beiden höchsten Energiepreisniveaus fort. Insgesamt ist festzustellen, dass unter den getroffenen Annahmen die Energiepreisentwicklung einen deutlich stärkeren Endwerteeinfluss hat, als die Zinssatzentwicklung.

## 6.4.2 Variation der Vergleichsmietpreis- und der Zinssatzentwicklung für das Basisszenario V\_INST

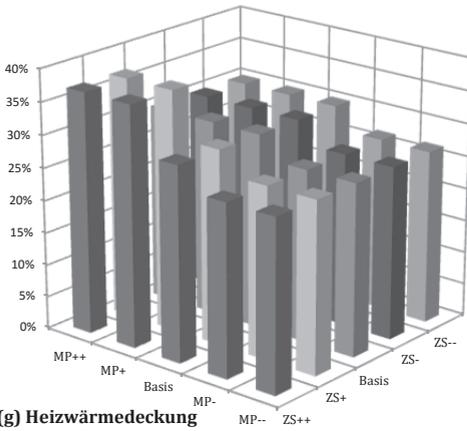
Für das Basisszenario V\_INST werden alternative Vergleichsmietpreisentwicklungen zusammen mit verschiedenen zukünftigen Zinssatzniveaus analysiert. Abbildung 28 zeigt eine Auswahl der Untersuchungsergebnisse. Insgesamt erweist sich die Basislösung V\_INST als relativ robust im vorgegebenen Parametervariationsbereich. Weder der Primärenergiebedarf noch der Transmissionswärmeverlust ändern sich. Die Entscheidungen zum Fensterersatz und zum Dämmstandard der Gebäudehüllflächen bleiben somit für alle Szenarien stabil. Gleiches gilt für die Wahl der Versorgungstechnologien. Abweichungen sind jedoch bei der Auslegung und dem Einsatz der Anlagen festzustellen. In den Diagrammen (a) bis (g) sind drei verschiedene Auslegungs- und Einsatzkonstellationen (AEK) erkennbar.

Die **AEK 1** wird unabhängig von der Zinssatzentwicklung im Zusammenhang mit den beiden niedrigsten Vergleichsmietpreisanstiegen (MP-- und MP-) empfohlen. Im Rahmen der untersuchten Szenarien wird mit dieser AEK der höchste Warmwasserbereitstellungsanteil aus der Solarthermieanlage angestrebt. Die installierte Kollektorfläche beträgt 20 m<sup>2</sup>. Für die Wärmespeicherung wird insgesamt ein Volumen von 1.200 l ausgewiesen. Der erreichte Deckungsanteil der Solaranlage beträgt knapp 37 % des Warmwasserbedarfs inklusive der Zirkulationsverluste. Die Wärmepumpe übernimmt ca. 39 % der Warmwasser- und 27 % der Heizwärmebereitstellung. Ihr Einsatzschwerpunkt liegt vor allem in den Morgen- und Abendstunden. Wie im Basiszenario wird auch hier der Sondertarif für die Stromversorgung der Wärmepumpe (WP-Strom ST 1 – vgl. Tabelle 11<sup>s. 178</sup>) gegebenenfalls mit Betriebsunterbrechung der Anlage gewählt. Der Brennwertkessel leistet neben dem Hauptanteil der Raumwärmeversorgung die restlichen 24 % der Warmwasserbereitstellung und kann diese auch im Falle unzureichender Bedarfsdeckung aus der Solaranlage sicherstellen.

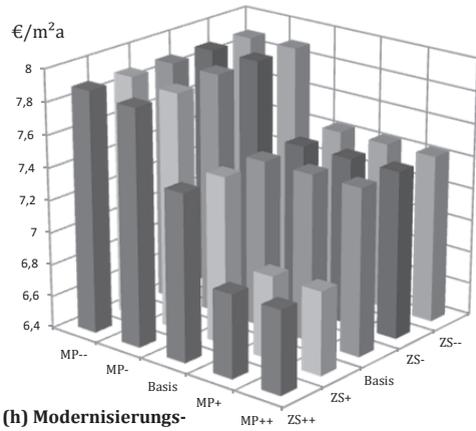
Oberhalb von MP- dominiert die **AEK 2**, welche der Lösung des Basisszenarios entspricht (siehe Unterabschnitt 6.3.2.2<sup>s. 195</sup>). Lediglich für die Kombinationen der stärksten Vergleichsmietpreisanstiege (MP++ und MP+) mit den beiden höchsten Zinssatzniveaus (ZS++ und ZS+) wird die **AEK 3** bevorzugt. Mit 10 m<sup>2</sup> Bruttokollektorfläche und 550 kWh/m<sup>2</sup>a Energieertrag leistet die Solarthermieanlage in dieser AEK nur ca. 19 % der Wassererwärmung. Nahezu der gesamte restliche Warmwasserbedarf sowie ca. 37 % des Heizwärmebedarfs werden durch die Wärmepumpe gedeckt. Um die hohen Deckungsanteile der Wärmepumpe zu erreichen, wird hier auf die Inanspruchnahme eines günstigeren Strombezugstarifs mit möglicher Betriebsunterbrechung der Anlage verzichtet. Aufgrund der permanenten Verfügbarkeit der Wärmepumpe, kann der Brennwertkessel mit einer etwas kleineren Leistung als in den anderen Szenarien ausgelegt werden.



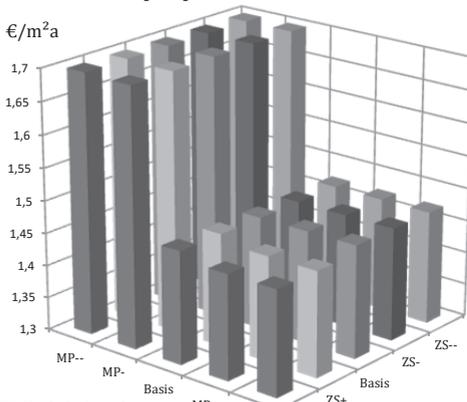
**Abbildung 28:** Ergebnisse verschiedener Vergleichsmietpreis- und Zinssatzentwicklungen für das Szenario V\_INST (Hinweis: Zur besseren Erkennbarkeit variiert die Reihenfolge der Szenarien an den Achsen)



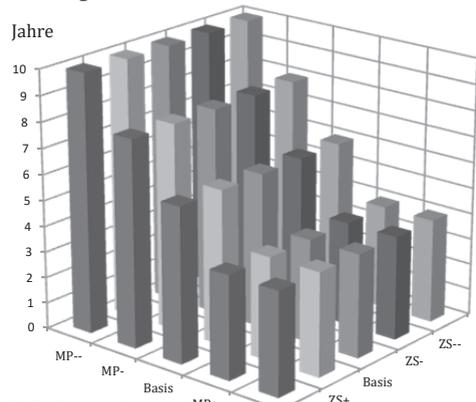
**(g) Heizwärmedeckung durch Wärmepumpe**



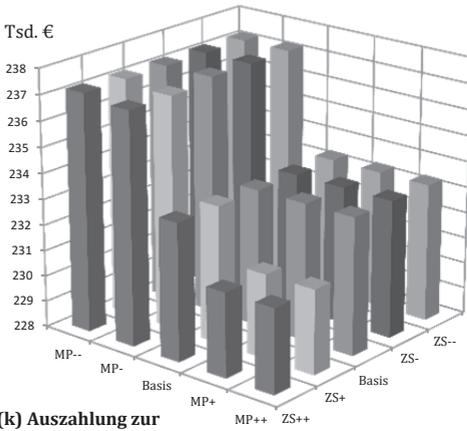
**(h) Modernisierungsumlage**



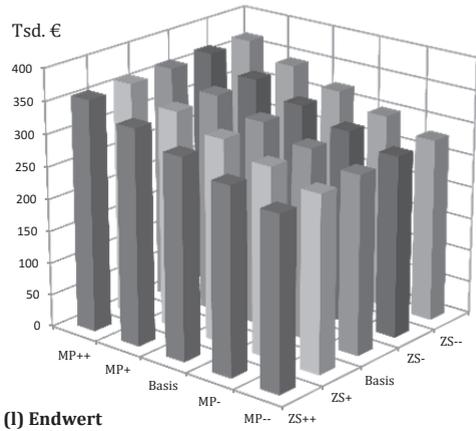
**(i) Reduktion des Vergleichsmietpreises**



**(j) Zeitraum ohne Mietpreisanpassung**



**(k) Auszahlung zur Maßnahmenumsetzung**



**(l) Endwert**

(Fortsetzung Abbildung 28)

Die Anfangsauszahlungen zur Maßnahmenumsetzung variieren bei einem Gesamtvolumen von jeweils über 231.000 € kaum nennenswert um 6.000 € zwischen den einzelnen AEK (k). Auch die Modellentscheidung zur Maßnahmenanfangsfinanzierung bleibt von der Parameteränderung weitgehend unberührt. In jedem Szenario ist das 20-jährige Darlehen des KfW-Programms 151 mit den EH 100-Anforderungen Teil der Lösung. Der vorgegebene maximale Fremdmittelanteil von 30 % wird dabei jedes Mal vollständig ausgeschöpft. Für die AEK 1 kann aufgrund der installierten Anlagengröße zusätzlich der Investitionszuschuss des BAFA für die Solarthermienutzung in Anspruch genommen werden. Dieser beträgt für die ausgewiesene Kollektorfläche allerdings nur 1.800 €.

Da der errechnete Gebäudeprimärenergiebedarf konstant bleibt, gilt für alle Szenarien dasselbe Vergleichsmietpreinsniveau des Mietspiegels. Für die Mietpreisentwicklung der Bestandsmieter zum Umsetzungszeitpunkt ist festzustellen, dass in jedem Fall zunächst die Anhebung nach § 558 BGB auf das Vergleichsmietpreinsniveau für den Gebäudeausgangszustand erfolgt. Nach der Maßnahmenumsetzung wird die Modernisierungumlage nach § 559 BGB geltend gemacht (h). Vor dem Hintergrund der Warmmietenneutralitätsprämisse repräsentieren diese Werte gleichzeitig die mittlere Kostenreduktion der Bestandsmieter in den ersten drei Jahren nach der Maßnahmenumsetzung. Sie fällt für die AEK 1 mit  $7,89 \text{ €/m}^2\text{a}$  am höchsten und für die AEK 3 mit  $6,92 \text{ €/m}^2\text{a}$  am niedrigsten aus. Das durch die Maßnahmen erreichte Vergleichsmietpreinsniveau wird durch die Modernisierungumlage im Umsetzungsjahr bei der AEK 1 um  $2,61 \text{ €/m}^2\text{a}$ , bei der AEK 2 um  $2,16 \text{ €/m}^2\text{a}$  und bei der AEK 3 um  $1,64 \text{ €/m}^2\text{a}$  überschritten. Zusammen mit der Vergleichsmietpreisentwicklung und unter Berücksichtigung der Zinsverbilligungen und Zuschüsse (i) ergeben sich daraus unterschiedliche Zeiträume, in denen eine Mietpreisanpassung nach der Maßnahmenumsetzung ausgeschlossen ist. Für die Szenarien MP++ und MP+ beträgt dieser Zeitraum 4 Jahre und verlängert sich schrittweise um jeweils 2 Jahre für die Szenarien mit geringerem Vergleichsmietpreisanstieg (j).

Aus den eben beschriebenen Ergebnissen der Szenarioanalyse lassen sich für die Endwertentwicklung (l) im Parameteränderungsbereich folgende Schlüsse ziehen:

Mit den geplanten Entnahmen im Analysezeitraum (im Mittel  $34.700 \text{ €/a}$ ) schwanken die erreichbaren Endwerte zwischen rund 269.000 € für das Szenario MP--/ZS++ und 368.000 € für das Szenario MP++/ZS-- (j). Zunächst ist festzustellen, dass weder die Preisdifferenzierung des Mietspiegels noch die erreichbaren Darlehensbedingungen in Abhängigkeit des energetischen Gebäudestandards eine Auswirkung auf die Endwertänderung haben.

Der Endwerteeinfluss des Zinssatzniveaus ist relativ gering. Dies ist einerseits auf die weitgehend homogene Finanzierungsstruktur und die Möglichkeit zur steuerlichen Geltendmachung der Fremdkapitalzinsen zurückzuführen. Andererseits wird der Einfluss dadurch abgeschwächt, dass sich mit zunehmendem Zinsniveau zwar die Kapitaldienste erhöhen, gleichzeitig aber auch die Erträge aus den Kapitalanlagen ansteigen. Dieser Zusammenhang gilt für den umgekehrten Fall ebenso.

Der Endwerteeinfluss der Vergleichsmietpreisentwicklung ist unter den getroffenen Annahmen dagegen deutlich stärker ausgeprägt. Erwartungsgemäß werden mit zunehmendem Vergleichsmietpreisanstieg auch höhere Endwerte realisiert. Im Zusammenhang mit den daraus resultierenden Möglichkeiten zur Steigerung der Bestandsmieten nach der Maßnahmenumsetzung lässt sich auch die relativ hohe Sensibilität der Ergebnisse hinsichtlich der Auslegung und des Einsatzes der Versorgungsanlagen innerhalb des Parametervariationsbereiches erklären.

In Verbindung mit den unmittelbar anstehenden Instandsetzungsarbeiten ist für alle Szenarien eine Modernisierung vorteilhaft, mit der das höchste Vergleichsmietpreinsniveau des unterstellten Mietpiegels erreicht wird (siehe Tabelle 13<sup>S. 180</sup>). Jede der drei AEK erfüllt hierfür gerade die Mindestanforderung zur Beschränkung des Primärenergiebedarfs auf 50 kWh/m<sup>2</sup>a. Durch diese Investition können dauerhaft höhere Mieteneinnahmen gegenüber dem Gebäudeausgangszustand erzielt werden, welche nicht nur die umgesetzten Maßnahmen refinanzieren, sondern auch zusätzliche Erträge darüber hinaus darstellen. Abweichungen zeigen sich jedoch bei den durch die Modernisierungsumlage zulässigen Überschreitungen des Vergleichsmietpreises. Die Ursache hierfür ist in den unterschiedlichen Steigerungsraten der Vergleichsmietpreise und der davon abhängigen Dauer des Zeitraums zu sehen, den das Vergleichsmietpreinsniveau benötigt, um den aktuellen Mietpreis der Bestandsmieter nach der Modernisierung zu erreichen. Erst danach ist die nächste Mietpreiserhöhung auf Grundlage des § 558 BGB möglich. Je langsamer der Vergleichsmietpreis ansteigt, desto länger kann ein Modernisierungsumlageanteil, welcher zur Überschreitung des Vergleichsmietpreises führt, zur Refinanzierung bzw. Erwirtschaftung zusätzlicher Erträge beitragen.

Vor diesem Hintergrund erweist es sich für den Vermieter in den Szenarien MP-- und MP- als vorteilhaft, die geringfügig höheren Anfangsauszahlungen für die AEK 1 mit verstärktem Einsatz von Solarthermie und den günstigeren Wärmepumpenstromtarif in Kauf zu nehmen, um eine höhere Modernisierungsumlage unter Beachtung der Warmmietenneutralitätsprämisse durchzusetzen. Bei den Szenarien oberhalb von MP- ist die Vorteilhaftigkeit der Vergleichsmietpreisüberschreitung durch die Modernisierungsumlage dagegen geringer ausgeprägt, da sich durch die höheren Steigerungsraten der Vergleichsmietpreise hier innerhalb kürzerer Zeiträume erneute

Mietsteigerungsmöglichkeiten auf Grundlage des § 558 BGB ergeben. Dementsprechend wird es für den Vermieter zunehmend attraktiver, das Investitionsvolumen zulasten der erreichbaren Energiekostensparnis für die Mieter zu reduzieren. Eine weitere geringfügige Senkung der Anfangsauszahlungen wird durch die kleinere Gesamtkapazität der Wärmeerzeugungsanlagen mit der AEK 3 erreicht. Hier fällt auch die Kostenreduktion für die Mieter am geringsten aus, was hauptsächlich auf den verstärkten Einsatz der Wärmepumpe und dem gleichzeitigen Wegfall des günstigeren Wärmepumpenstromtarifs zurückzuführen ist. Die Empfehlung zur AEK 3 erfolgt allerdings nur im Zusammenhang mit den erhöhten Zinssatzniveaus, sodass sich die Vorteilhaftigkeit für den Vermieter in erster Linie durch den reduzierten Eigen- und Fremdkapitaleinsatz begründen lässt. Während die alternative Kapitalanlage an Attraktivität gewinnt, verteuert sich gleichzeitig die Darlehensanschlussfinanzierung.

## 6.5 Problemgröße und Modellperformance

Nach der Ergebnisvorstellung für die beiden Anwendungsfälle werden in diesem Unterkapitel abschließend noch einige Informationen zur Problemgröße und zur Modellperformance für die Szenariorechnungen sowie allgemein zur Datenhaltung und zum Modellaufbau gegeben.

Der mathematische Modellcode von *BRIAMO* umfasst in der *GAMS*-Syntax mehr als 100 deklarierte Nebenbedingungen, die je nach Analysefall zum Einsatz kommen, und über 200 deklarierte Parameter, mit denen die zu betrachtende Modernisierungsentscheidung realitätsnah charakterisiert werden kann. Zusätzlich beinhaltet der Modellcode diverse Steuerungsparameter, welche die Funktion und Ausprägung einzelner Restriktionen beeinflussen. Einige davon können zur Beschleunigung der Lösungsfindung genutzt werden. Andere dienen dagegen zur Berücksichtigung methodischer Präferenzen des Modellanwenders – bspw. zum Aufbau der vollständigen Finanzplanung.

Die Datenhaltung und Modellierung der Entscheidungssituation erfolgt im *xlsx*-Dateiformat. Über die standardisierte *GDX*-Schnittstelle der *GAMS*-Software werden die Eingangsdaten während des Modellaufbaus eingelesen. Die Modellergebnisse können ebenfalls im *xlsx*-Format ausgegeben werden. Für viele der Eingangsparameter sind bereits typische Standardwerte im Modell hinterlegt, welche in der Datenhaltung durch den Modellanwender aber fallspezifisch angepasst werden können.

Dennoch ist der Modellierungsaufwand als relativ hoch einzuschätzen, insbesondere dann, wenn stromerzeugende Anlagen hinsichtlich der steuerlichen Rahmenbedingungen und der differenzierten staatlichen Förderbedingungen detailliert in die

Analyse einbezogen werden sollen. Zu beachten ist allerdings, dass es sich bei einer umfassenden Berücksichtigung der zahlreichen Aspekte der Modernisierungsentscheidung um eine komplexe Planungsaufgabe handelt, deren Umsetzung mit einem durchaus beträchtlichen Investitionsvolumen einhergehen kann und in der Regel eine langfristige Kapitalbindung bedingt. Vor diesem Hintergrund erscheint der Modellierungsaufwand vertretbar.

Für die Modellrechnungen wird der kommerziell verfügbare *CPLEX*-Solver eingesetzt. Wesentliche Faktoren, welche die Problemgröße und Rechenzeit des Optimierungsmodells entscheidend beeinflussen, sind die Anzahl der Gebäudezonen, die Anzahl der Systemgestaltungsoptionen, die Anzahl der Finanzierungsvarianten sowie die Strukturierung des Analysezeitraums hinsichtlich der Anzahl der Umsetzungszeitpunkte und der unterjährigen Zeitscheiben.

Für den Vermieteranwendungsfall kann sich zusätzlich die Bestimmung der optimalen Mietpreissteigerungsstrategie schon bei kleinen Mieterwechselraten als besonders problematisch erweisen. Hier ist in jedem Fall zu empfehlen, unterstützend einzugreifen. So sollte sowohl für die Mietpreissteigerung als auch den Mietpreis eine obere Schranke vorgegeben werden, die durch eine Best-Case-Betrachtung vorab bestimmt werden kann. Weiterhin ist es vor dem Hintergrund der zu berücksichtigenden Mietsteigerungssperrfrist möglich, Mietpreisanpassungen zumindest für die Neumieter nach dem letzten Umsetzungszeitpunkt im Analysezeitraum auf einzelne Modelljahre zu beschränken. Für diese Mieter hat die Modernisierungsentscheidung keinen Einfluss auf den Zeitpunkt der Mietpreisanpassungen, sodass sich in der Regel die frühestmögliche Anpassung nach dem Mietbeginn als vorteilhafteste Handlungsoption erweisen sollte. Durch diese Vorgaben lässt sich die Rechenzeit erheblich reduzieren (> Faktor 10), ohne dass die Ergebnisqualität beeinflusst wird.

Für die vorgestellten Szenarien mit lediglich einer Gebäudezone, einem Umsetzungszeitpunkt und 225 unterjährigen Zeitscheiben umfassen die Problemstellungen bei der Eigennutzerfallstudie im Mittel 13.200 Variablen (davon rund 500 ganzzahlig) und annähernd ebenso viele Nebenbedingungen. Die Matrix des Optimierungsproblems beinhaltet ca. 126.000 Non-Zero-Elemente. Die Modellaufzeit bis zur Ausgabe der optimalen Lösung ohne Vorgabe eines Optimalitätskriteriums zum vorzeitigen Abbruch beträgt auf einem Windows-PC (2 Prozessoren 3,3 GHz, mit je 4 Kernen und 2 Threads pro Kern) durchschnittlich 8,5 Minuten und schwankt zwischen 3 und 11 Minuten. Für die Vermieterfallstudie weisen die Szenarioproblemstellungen jeweils rund 12.400 Variablen (davon ca. 600 ganzzahlig) und im Mittel 11.000 Nebenbedingungen auf, wobei die Matrix des Optimierungsproblems ca. 60.000 Non-Zero-Elemente beinhaltet. Die Rechenzeit beträgt hier im Mittel 34 Minuten bei einer Schwankungsbreite von 7 bis 163 Minuten.



# Kapitel 7

## Schlussfolgerungen und Ausblick

Anhand der im vorangegangenen Kapitel beschriebenen Analyse zur energetischen Gebäudemodernisierung wird die Anwendung und Aussagekraft des im Rahmen der vorliegenden Arbeit neu entwickelten Modells *BRIAMO* (*Building Refurbishment Investment Advising by Mathematical Optimization*) demonstriert.

Im Zuge der Schlussfolgerungen zur Arbeit ist zunächst darzulegen, dass *BRIAMO* der eingangs vorgegebenen Zielsetzung – ein Analyseinstrument zu entwickeln, das die Entscheidungssituation von Gebäudeeigentümern bei der Planung von Modernisierungsmaßnahmen nachbildet und optimale Handlungsempfehlungen unter Berücksichtigung der vielfältigen techno-ökonomischen Entscheidungsaspekte bereitstellt – vollständig gerecht wird. Dies erfolgt in Verbindung mit einer zusammenfassenden methodischen Charakterisierung des Modells. Im Anschluss daran werden die Ergebnisse der beispielhaften Anwendungsfälle erneut aufgegriffen, um daraus Schlussfolgerungen für das betrachtete Gebäude zu ziehen. Darauf aufbauend wird der Analyseansatz einer kritischen Reflexion unterzogen. Das Kapitel schließt mit einem Ausblick auf weitere Anwendungs- bzw. Analysemöglichkeiten von *BRIAMO* wobei auch Ansatzpunkte zur methodischen Weiterentwicklung des Modells aufgezeigt werden.

### 7.1 Zum entwickelten Analyseinstrument *BRIAMO*

Mit dem in dieser Arbeit entwickelten *BRIAMO*-Modell wird erstmals eine Methodik zur umfassenden Abbildung der Entscheidungssituation von Gebäudeeigentümern im Zuge der Modernisierungsplanung vorgestellt. Der Ansatz ermöglicht eine integrierte Wirtschaftlichkeitsanalyse der dabei bestehenden Handlungsoptionen hinsichtlich der Maßnahmenwahl und -auslegung, des Anlageneinsatzes sowie der Wahl der Finanzierungsinstrumente unter Berücksichtigung von Steuern und der entscheidungsbeeinflussenden Rahmenbedingungen in Abhängigkeit der Eigentümer-Nutzer-Beziehung.

Der Zweck des Modells ist die Ermittlung der optimalen Handlungsempfehlung für den Gebäudeeigentümer, die jeweils an einer von drei alternativen Zielsetzungen ausgerichtet werden kann. Hierbei handelt es sich um die *Maximierung des Einkommens*, die *Maximierung des Vermögens* oder die *Minimierung des Gebäudeprimärenergiebedarfs*. Für die Modellanwendung mit der gewählten Zielsetzung können jeweils Mindestanforderungen an die Zielgrößen der beiden anderen Zielsetzungen vorgegeben werden. Mithilfe dieser drei Analysevarianten ist es möglich, die Grenzen des wirtschaftlichen Handlungsspielraums bei der energetischen Modernisierung für den Gebäudeeigentümer zu bestimmen.

Da der entscheidungstragende Akteur „Eigentümer“ in verschiedenen Rollen auftritt und somit unterschiedlichen Rahmenbedingungen zur ökonomischen Beurteilung der Modernisierungsmaßnahmen unterworfen ist, kann mit dem Modell sowohl die Perspektive der *Immobilienbewirtschaftung* als auch der *Immobilieeigennutzung* eingenommen werden. Darüber hinaus ist es auch möglich, die *Bewirtschaftung von PV- und KWK-Anlagen* sowie verschiedene Rollenkombinationen eines Eigentümers (bspw. Eigennutzer und Vermieter oder Vermieter und KWK-Anlagenbetreiber) innerhalb des Gebäudes zu betrachten.

Der zentrale methodische Ansatz zur Abbildung der technischen Aspekte der Modernisierungsentscheidung und ihrer Wirkungsbeziehungen ist die Modellierung des Gebäudeenergiesystems in Form eines *Energieflussgraphen*. Als Treiber der Flüsse wird die Nachfrage nach Energieanwendungen (Raumwärme und gegebenenfalls -kühlung, Warmwasser und elektrische Energie) im Ausgangszustand des Gebäudes vorgegeben. Auf den vorgelagerten Stufen des Graphen sind verschiedene energie-relevante Systemgestaltungsoptionen in den Graphenknoten modelliert. Durch die Entscheidungen zu ihrer Auslegung und ihrem Einsatz ist die Energienachfrage zu decken. Bei den Systemgestaltungsoptionen handelt es sich sowohl um Anlagen zur Energiebereitstellung oder -speicherung als auch um Systemkomponenten, welche die Energienachfrage selbst beeinflussen können, wie bspw. Wärmedämmungen.

Den Energieflüssen und Systemgestaltungsoptionen werden technische und ökonomische Parameter hinterlegt. Die technischen Größen beschreiben die Wirkungsweise und die Einsatzfähigkeit der Systemoptionen, bspw. zur Umwandlung der an der Gebäudegrenze bereitgestellten Energieformen in die benötigten Energieformen. Die ökonomischen Parameter beschreiben die monetären Auswirkungen der Systemgestaltung und umfassen u. a. die Preise für die Maßnahmenumsetzung und die Instandhaltung sowie für den Energiebezug und die Energielieferungen aus den stromerzeugenden Anlagen.

Der Energieflussgraph ist einer vereinfachten zeitlichen und räumlichen Strukturierung unterworfen. Die zeitliche Strukturierung dient einerseits zur Gliederung des Analysezeitraums in Modelljahre, von denen einzelne als mögliche Umsetzungszeitpunkte für Modernisierungsmaßnahmen zu definieren sind. Andererseits erlaubt die unterjährige zeitliche Gliederung des Graphen, sowohl die saisonal und tageszeitlich variierende Energienachfrage als auch die Nutzbarkeit von Umweltenergien in Form von Lastverläufen bzw. Verfügbarkeitsprofilen für typische Wochentage vorzugeben. Hierdurch ist die Voraussetzung geschaffen, die Maßnahmenauslegung in Verbindung mit dem (gegebenenfalls kombinierten) Einsatz von Versorgungsanlagen detailliert in die Analyse einbeziehen zu können.

Durch die räumliche Strukturierung ist es möglich, Teileigentumsverhältnisse und verschiedene Eigentümer-Nutzer-Beziehungen für einzelne Gebäudebereiche widerzuspiegeln. Den Gebäudebereichen werden in Abhängigkeit der Akteursrolle ihrer Eigentümer Parameter hinterlegt, welche die relevanten ökonomischen und rechtlichen Rahmenbedingungen für die Entscheidungsfindung beschreiben. Dazu zählen u. a. die Bestimmungsgrößen der Einkommensteuer oder die erforderlichen Daten zur Mietpreisbildung im Falle der Gebäudebewirtschaftung.

Das zentrale methodische Element zur Erfassung der monetären Konsequenzen und zur ökonomischen Beurteilung der Systemgestaltung bildet eine *vollständige Finanzplanung*. Im Gegensatz zu den klassischen Verfahren der Investitionsrechnung erlaubt sie die simultane Betrachtung mehrerer, sich hinsichtlich der Konditionen (Zinssatz, Laufzeit etc.) unterscheidender Investitions- und Finanzierungsmöglichkeiten. Der Einsatz einer vollständigen Finanzplanung erfüllt damit die wesentliche Zielstellung, die breit gefächerte staatliche Förderlandschaft für Gebäudemodernisierungen in Form von Zuschüssen und zinsverbilligten Darlehen in die Entscheidungsfindung einbeziehen zu können. Die Abhängigkeit der Bewilligung der Fördermittel von der Maßnahmenwahl bzw. dem erreichten energetischen Gebäudezustand wird dabei ebenso berücksichtigt, wie die Auswirkung ihrer Inanspruchnahme auf die Mietpreisbildung.

Die Entscheidungssituation wird als *gemischt-ganzzahliges lineares Optimierungsproblem* formuliert, um die vorteilhafteste Handlungsalternative für den Gebäudeeigentümer zu bestimmen. Hierfür ist dem *BRIAMO*-Modell ein umfangreiches Restriktionensystem in der Programmsprache *GAMS* hinterlegt, das u. a. die Wirkungsketten innerhalb des Energieflussgraphen, die vollständige Finanzplanung und die rechtlichen Rahmenbedingungen beschreibt. Zur Lösung des Problems kommt das *Branch-and-Cut-Verfahren* zum Einsatz, welches mithilfe des kommerziellen *CPLEX*-Solvers durchgeführt wird. Dieses Verfahren ermöglicht eine exakte Lösung, kann aber auch als Heuristik eingesetzt werden, um für komplexere Anwendungsfälle eine relativ gute Lösung in vertretbaren Rechenzeiten zu erreichen.

Mit der Abbildungs- und Analysemethodik des *BRIAMO*-Modells ist es möglich, ein breites Spektrum an einzelnen technischen und ökonomischen Handlungsoptionen innerhalb der Modernisierungsplanung zu erfassen. Die Alternativenbildung hinsichtlich des umzusetzenden Maßnahmenbündels, der zu wählenden Maßnahmenfinanzierung und der Bestimmung weiterer ökonomischer Entscheidungsgrößen (bspw. Mietpreise) wird durch das Modell vorgenommen. Gleichzeitig gewährleistet die Verwendung von standardisierten Abbildungselementen mit separater Parametrierung eine flexible Anpassungsfähigkeit des Modells an verschiedene Entscheidungssituationen zur Gebäudemodernisierung.

Das mathematische Restriktionensystem von *BRIAMO* stellt einerseits sicher, dass nur eine zulässige Alternative als Handlungsempfehlung ausgegeben wird. In diesem Zusammenhang werden auch Budgetbeschränkungen und Liquiditätsanforderungen des Eigentümers beachtet. Andererseits ermöglicht es die Vorgabe von einzelnen Handlungszwängen zur Instandsetzung oder Erfüllung gesetzlicher Vorgaben sowie die Berücksichtigung nicht (vorrangig) wirtschaftlich getriebener Zielsetzungen und Präferenzen, wie bspw. den bevorzugten Einsatz einer bestimmten Technologie oder die Forderung nach einer warmmietenneutralen Modernisierung für Mieter.

Aus Sicht der Investitionsrechnung ist der Analyseansatz der *simultanen Investitions-, Finanzierungs- und Produktionsprogramm-/Anlageneinsatzplanung* zuzuordnen, die wahlweise *ein- oder mehrstufig* erfolgen kann. Mit Blick auf den Gebäudeeigentümer und seinen realen Handlungsspielraum handelt es sich um ein *Partialmodell*, welches sich auf bestehende Handlungsoptionen im Rahmen der Modernisierungsplanung beschränkt. Diese wird als *rollierende Planungsaufgabe* verstanden, sodass der Analysefokus auf den zeitnah zu treffenden Entscheidungen liegt. Die dabei bestehenden Unsicherheiten der Eingangsdaten können aus Gründen der Komplexitätsreduktion nur indirekt Berücksichtigung finden.

## 7.2 Schlussfolgerungen aus den Fallstudien

Aus den Ergebnissen der Modellanwendung für die zwei untersuchten Fallstudien („Eigennutzer“ und „Vermieter“) werden im Folgenden Schlussfolgerungen für das betrachtete Beispielgebäude im Rahmen einer zusammenfassenden Gegenüberstellung der untersuchten Basisszenarien gezogen. Dabei stehen insbesondere die ökonomischen Konsequenzen der ermittelten Handlungsempfehlungen im Mittelpunkt. Eine Übersicht zur Szenariodefinition findet sich in Tabelle 7 <sup>S. 166</sup>. Die Handlungsempfehlungen sind in Tabelle 18 <sup>S. 187</sup> und Tabelle 19 <sup>S. 193</sup> zusammengefasst. Die dazugehörigen Finanzpläne können dem Anhang (Tabelle 20 bis Tabelle 27) entnommen werden.

Die Benennung generell vorteilhafter Handlungsweisen zur Gebäudemodernisierung ist auf Grundlage einer einzelnen Gebäudebetrachtung angesichts der zahlreichen objekt- und standortspezifischen Einflussfaktoren bei der Alternativenbeurteilung natürlich nicht möglich. Jedoch lassen sich aus den Ergebnissen einige Erkenntnisse ableiten, die auch für andere, gegebenenfalls ähnlich gelagerte Entscheidungssituationen zur Gebäudemodernisierung zutreffen können.

### 7.2.1 Eigennutzerfallstudie

In der Eigennutzerfallstudie kann durch die sofortige Umsetzung von Maßnahmen, auch ohne dass Instandsetzungsarbeiten vorgesehen sind (Szenario E\_FREI), der Endwert um knapp 120.000 € im Vergleich zur Maßnahmenunterlassung (keine Gebäudemodernisierung) gesteigert werden. Der Zuwachs spiegelt sich fast vollständig in dem Anstieg des liquiden Mittelbestandes im Analysehorizont wider und ist maßgeblich auf die Verringerung der jährlichen Auszahlungen zur Energieversorgung um durchschnittlich 7.650 €<sup>138</sup> zurückzuführen. Der Großteil der Einsparungen wird im Bereich der privaten Stromnutzung erzielt. Weiterhin ist festzustellen, dass für das betrachtete Gebäude die KfW- und BAFA-Förderung keinen Einfluss auf die Vorteilhaftigkeit der Maßnahmen hat. Die sofortige Umsetzung dieses Maßnahmenbündels wäre auch ohne die genutzten Zuschüsse und zinsverbilligten Darlehen für die Gebäudeeigentümer zu empfehlen. Die Förderungen tragen hier lediglich zu einer leichten Erhöhung des Endwertes um ca. 3 % bei, die – absolut betrachtet – immerhin 12.000 € beträgt.

Die mögliche Überförderung von Modernisierungsvorhaben stellt ein generelles Problem dar, welches u. a. dann entstehen kann, wenn die Förderhöhe vorrangig an der Umsetzung von Einzelmaßnahmen bzw. an dem dadurch erreichten energetischen Gebäudestandard orientiert wird. Bleibt der Gebäudeausgangszustand als Bezugsgröße für die wirtschaftliche Besserstellung des Eigentümers durch die Modernisierung außen vor, kann dies – wie im vorliegenden Fall – dazu führen, dass auch Maßnahmen gefördert werden, die ohnehin aus ökonomischer Sicht zu empfehlen sind. Dieser Umstand wird bspw. in der Arbeit von *STENGEL* [248] ausführlicher untersucht, in welcher fallspezifische Ausgestaltungen von Förderinstrumenten mit unterschiedlichen Differenzierungsgraden identifiziert und u. a. hinsichtlich einer Überförderung gegenübergestellt werden.

---

<sup>138</sup> Anteil an den gesamten laufenden Auszahlungen für den Energiebezug von externen Lieferanten sowie Instandhaltung und Betrieb der Versorgungsanlagen, welcher ausschließlich der Energieversorgung der Gebäudenutzer zuzurechnen ist, inklusive KWK-Zuschlag, EEG-Umlage und USt.

Der maximierte Endwert des Szenarios E\_INST (mit geplanter Instandsetzung) fällt um 43.000 € geringer aus als im Szenario E\_FREI. Das ist vor allem auf die geplanten Arbeiten zum Umsetzungszeitpunkt – insbesondere den Ersatz der Bestandsfenster – zurückzuführen, welche unabhängig von der ökonomischen Vorteilhaftigkeit nicht weiter hinausgezögert werden sollen. Jedoch ist zu erkennen, dass im Zusammenhang mit den geplanten Auszahlungen die Investition in Modernisierungen wesentlich umfangreicher ist. Dabei zeigt sich nun auch die gewünschte Wirksamkeit der staatlichen Förderinstrumente für das betrachtete Gebäude, da ohne diese Mittel die Dämmung der Außenwand trotz des vorgesehenen Anstrichs aus rein ökonomischer Sicht kein Teil der Handlungsempfehlung wäre.

Der höhere Investitionsumfang in Maßnahmen mit über den Analysezeitraum hinausreichenden Nutzungsdauern beeinflusst im Szenario E\_INST den Endbestand an liquiden Mitteln. Dieser ist deutlich geringer als beim Szenario E\_FREI, da der maximierte Endwert nun einen größeren Anteil an gebundenen Maßnahmenrestwerten beinhaltet. Der liquide Endwertanteil erreicht aber beinahe denselben Wert wie bei der Unterlassungsalternative. Somit amortisieren sich die instandsetzungs- und modernisierungsbedingten Anfangsauszahlungen fast vollständig innerhalb des Analysezeitraums – selbst ohne Berücksichtigung der gebundenen Restwerte, welche nur im Zusammenhang mit dem Verkauf des Gebäudes liquidiert werden könnten. Die durchschnittlichen Auszahlungen für die eigene Energieversorgung inklusive der privaten Stromnutzung reduzieren sich um knapp 12.000 €/a im Vergleich zur Maßnahmenunterlassung. Allerdings steht dieser Reduktion auch eine erhebliche Erhöhung der Kapitaldienste gegenüber.

Im Szenario E\_MPEB (minimaler Primärenergiebedarf) entspricht der Endwert wie gefordert dem Endwert der Unterlassungsalternative. Das Modellergebnis zeigt somit, dass unter Einhaltung der Wirtschaftlichkeitsprämisse für das betrachtete Gebäude eine beachtliche Primärenergiebedarfsreduktion von 173 kWh/m<sup>2</sup>a im Ausgangszustand auf 37 kWh/m<sup>2</sup>a realisiert werden kann. Die Verringerung der Auszahlungen zur Energieversorgung der Gebäudenutzer gegenüber der Unterlassungsalternative beträgt rund 8.700 €/a und muss aufgrund der Zielsetzung zur Minimierung des Primärenergiebedarfs wesentlich länger zur Refinanzierung der Modernisierungsmaßnahmen beitragen. Deshalb wird hier auch trotz der hohen Zinssätze der Anschlussfinanzierung ein langfristiges Darlehen gewählt. In den beiden anderen Eigentumerszenarien wurden dagegen mittelfristige Darlehen mit fixiertem Zinssatz über die gesamte Laufzeit bevorzugt. Festzustellen ist weiterhin, dass keine Amortisation der Maßnahmen innerhalb des Analysezeitraums erreicht wird. Der Endbestand an liquiden Mitteln übersteigt zwar den geforderten Mindestwert für die Instandhaltungsrücklage, liegt aber deutlich unter dem Wert der Unterlassungsalternative.

Obwohl die Wirtschaftlichkeitsprämisse eingehalten wird, sind die Gebäudeeigentümer im Szenario E\_MPEB aus rein monetärer Sicht eindeutig schlechter gestellt als in den anderen beiden Basisszenarien der Eigennutzerfallstudie. Zwar erhöhen sich die Anfangsauszahlungen zur Maßnahmenumsetzung mit 34.000 € verhältnismäßig geringfügig gegenüber dem Szenario E\_INST, allerdings fällt die mittlere Reduktion der jährliche Auszahlungen zur eigenen Energieversorgung niedriger aus und entspricht in etwa der des Szenarios E\_FREI. Der Grund ist darin zu sehen, dass zur Minimierung des Primärenergiebedarfs stärker in Maßnahmen zur Reduktion des Energiebedarfs für die Wärmeversorgung zu investieren ist. Unter den getroffenen Annahmen weist dieser Bereich allerdings ein geringeres ökonomisches Einsparpotenzial für die Gebäudenutzer auf, als der Bereich ihrer privaten Stromnutzung. Letzterer wird bei der primärenergetischen Beurteilung des Gebäudes nach den geltenden Bewertungsrichtlinien jedoch nicht erfasst.

Die Gegenüberstellung der Szenarioergebnisse unterstreicht die große Spannweite, welche dem Wirtschaftlichkeitsbegriff innewohnt. Festzustellen bleibt, dass die Unterlassungsalternative für das betrachtete Gebäude in keinem Fall eine vorteilhafte Handlungsoption darstellt. Auch wenn Instandsetzungsarbeiten noch nicht erforderlich sind, ist durch die Umsetzung von Modernisierungen eine deutliche wirtschaftliche Besserstellung der selbstnutzenden Eigentümer zu erreichen. In diesem Fall sollte lediglich der Ersatz des vorhandenen Wärmeerzeugers noch etwas hinausgezögert werden, um diesen im Zuge der umfangreicheren Instandsetzung der Fenster und der Außenwand vorzunehmen, welche dafür zeitlich etwas vorverlagert werden könnten. Diese Vorgehensweise erscheint mit einem vergleichenden Blick auf die Handlungsempfehlungen für die Szenarien E\_FREI und E\_INST sinnvoll.

Wie bereits erwähnt, haben die berücksichtigten Förderinstrumente der KfW und des BAFA im Szenario E\_FREI keinen Einfluss auf die Initiierung bzw. den Umfang der Modernisierungsmaßnahmen. Im Szenario E\_MPEB unterstützen sie dagegen die Zielerreichung zur Minimierung des Primärenergiebedarfs, indem sie die Wirtschaftlichkeit der Maßnahmen von der Finanzierungsseite her steigern. Ohne die Fördermittel wäre unter den getroffenen Annahmen und unter Einhaltung der Wirtschaftlichkeitsprämisse eine Modernisierung finanzierbar, die einen Primärenergiebedarf von knapp 51 kWh/m<sup>2</sup>a nach der Maßnahmenumsetzung aufweist.

Auch für das Szenario E\_INST ist der Einfluss der staatlichen Instrumente im Rahmen der Einzelmaßnahmenförderung nachweisbar, dennoch wird trotz der vorgesehenen umfangreichen Instandsetzungsarbeiten kein KfW-Effizienzhausstandard für das Gebäude erreicht. Dahin gehend ist zu bedenken, dass aufgrund des aktuell extrem niedrigen Zinsniveaus (Stand 2014) die Differenzierungsmöglichkeiten zur KfW-Darlehenszinsverbilligung in Abhängigkeit des durch die Modernisierung erreichten

energetischen Gebäudestandards momentan nicht vorhanden sind. Die Förderhöhenstaffelung beschränkt sich auf die unterschiedliche Bezuschussung der Maßnahmen. Generell sollte sich ein niedriges Zinsniveau zwar positiv auf die Initiierung von Modernisierungsmaßnahmen auswirken, gleichzeitig gehen aber auch Ansatzpunkte für die staatliche Förderung zur Beeinflussung des Umfangs bzw. der Qualität der Modernisierung verloren.

Weiterhin ist festzustellen, dass die ökonomische Vorteilhaftigkeit von Investitionen in die Selbstversorgung mit elektrischer Energie die Handlungsempfehlungen für das betrachtete Gebäude dominiert – vor allem in den Szenarien mit Endwertmaximierung. Der Einsatz der KWK-Technologie erhöht zwar leicht die spezifischen Kosten der Wärmeversorgung, diese werden aber durch die erreichbaren Einsparungen gegenüber dem Strombezug von externen Lieferanten überkompensiert. Im Szenario E\_MPEB ist die KWK-Technologie aufgrund des deutlich reduzierten Wärmebedarfs kein Bestandteil der Systemgestaltung. Dagegen ist die Installation einer PV-Anlage wegen der fehlenden Abhängigkeit zum Wärmebedarf in allen drei Basisszenarien Teil der Modelllösung. Mit Blick auf die beschränkte Dachfläche reduziert sich im Szenario E\_MPEB allerdings die PV-Anlagengröße zugunsten der Solarthermienutzung.

Die ermittelten Eigennutzungsraten für KWK- und PV-Strom beinhalten hinsichtlich der ökonomischen Vorteilhaftigkeit des Anlageneinsatzes in den Basisszenarien noch einen gewissen Spielraum. So liegt für das betrachtete Gebäude im Rahmen der angenommenen Energiepreisentwicklung die wirtschaftliche Grenze zur Kombination der beiden Technologien bei einem Eigennutzungsanteil von ca. 33 % an der gesamten erzeugten Elektroenergie. Unterhalb dieses Wertes setzt sich die PV-Anlage gegenüber der KWK-Anlage durch. Für die PV-Anlage lässt sich zeigen, dass unter den getroffenen Annahmen bereits ab einem Eigennutzungsanteil von 10 %, welcher für ein Mehrfamilienhaus problemlos erreichbar sein sollte, die Investition als vorteilhaft zu bewerten ist.

Abschließend ist jedoch noch anzumerken, dass mit den unterstellten jährlich anfallenden Auszahlungen für Instandhaltung und Betrieb sowie den angesetzten Bemessungsgrundlagen für die Privatentnahmen weder die PV- noch die KWK-Anlage während des Analysezeitraums ein positives Ergebnis bei der steuerlichen Einnahmenüberschussrechnung aufweisen. Insbesondere für den Betrieb der KWK-Anlage, deren Nutzungsdauer annahmegemäß mit dem letzten Modelljahr endet, könnte unter Umständen die Gewinnerzielungsabsicht in Frage gestellt werden. Die PV-Anlage sollte dagegen ab den 21. Nutzungsjahr nach vollständiger Kredittilgung und steuerlicher Abschreibung einen steuerbaren Gewinn erwirtschaften.

## 7.2.2 Vermieterfallstudie

In der Vermieterfallstudie fallen die Endwertdifferenzen zwischen den einzelnen Szenarien und der Unterlassungsalternative mit maximal 23.000 € deutlich geringer aus, als in der Eigennutzerfallstudie. Dies ist vor allem auf die Verzinsung der alternativen Kapitalanlagen sowie auf die Prämissen zum Eigenfinanzierungsanteil (mindestens 30 %) und zum Erreichen der Warmmietenneutralität (innerhalb von 3 Jahren) zurückzuführen. Letztere Vorgabe stellt eine indirekte Verknüpfung der Vermieterentscheidung mit der Energiepreisentwicklung her, die ohne diese Einschränkung unabhängig davon wäre. Die gesetzlichen Regelungen zur Mietpreisbildung allein würden dagegen ein wesentlich höheres Potenzial zur Endwertsteigerung gegenüber der Unterlassungsalternative aufweisen. Die Rahmenbedingungen des unterstellten Mietspiegels mit einer Differenzierung der Vergleichsmietpreise anhand des Gebäudeprimärenergiebedarfs sowie die staatlichen Fördermittel bieten aber trotz der Warmmietenneutralitätsprämisse ein ausreichend hohes Potenzial, um auch umfangreiche Modernisierungsmaßnahmen für den Vermieter ökonomisch attraktiv zu gestalten.

Bei der Gegenüberstellung der Vermieter-Basiszenarien zeigt sich ebenfalls erwartungsgemäß, dass im Szenario V\_FREI (ohne geplante Instandsetzung) mit rund 334.000 € der höchste Endwert erreicht wird. Durch eine relativ geringe Anfangsauszahlung für Modernisierungsmaßnahmen lässt sich der Gebäudeprimärenergiebedarf auf 100 kWh/m<sup>2</sup>a reduzieren. Damit ist die Anforderung zum Erreichen des zweiten Vergleichsmietpreislevels über dem Ausgangsniveau gerade erfüllt. Auf dieser Grundlage können die Mieteinnahmen innerhalb des Analysezeitraums im Mittel um 3.600 €/a gesteigert werden. Wiederum ist festzustellen, dass die Umsetzung der Maßnahmen auch ohne die Zugriffsmöglichkeit auf Zuschüsse und zinsverbilligte Darlehen für den Vermieter zu empfehlen wäre. Die Förderung erhöht den Endwert um rund 13.000 € und beeinflusst lediglich den Dämmstandard der Kellerdecke, welcher ohne die Fördermittel den EnEV-Anforderungswert leicht überschreiten würde. Gleichzeitig beschleunigen die Fördermittel die Amortisation der Investition, welche bereits kurz vor dem Analysehorizont erreicht wird. Dies zeigt ein vergleichender Blick auf die liquiden Endmittelbestände von Szenario V\_FREI und der Unterlassungsalternative. Die Vorteilhaftigkeit der Maßnahmen in diesem Szenario ist somit fast ausschließlich auf den Mietspiegeleffekt zurückzuführen. Ohne seine Mietpreisdifferenzierung anhand energetischer Gebäudekennwerte – d. h. unabhängig vom Modernisierungsgrad gilt das Vergleichsmietpreisniveau des Gebäudeausgangszustandes – würden aus rein wirtschaftlicher Sicht keine Maßnahmen zum Umsetzungszeitpunkt initiiert.

Etwas anders stellt sich die Situation im Szenario V\_INST (mit geplanter Instandsetzung) dar. Zunächst ist wieder zu erkennen, dass sich für den Eigentümer die Attraktivität von Modernisierungen auch bei der Vermieterfallstudie erhöht, sofern Instandsetzungsarbeiten unmittelbar anstehen. Gleichzeitig ergänzen sich hier die Wirkungen des Mietspiegels und der staatlichen Förderinstrumente. Ohne die Differenzierung der Vergleichsmietpreise aber mit Zugriffsmöglichkeit auf KfW- und BAFA-Fördermittel wären zusätzlich zur Instandsetzung für den Vermieter Modernisierungen vorteilhaft, mit denen der Gebäudeprimärenergiebedarf auf rund  $61 \text{ kWh/m}^2\text{a}$  beschränkt werden könnte. Dies entspricht gerade den Anforderungen an den KfW-Effizienzhaus-Standard 115. Für den umgekehrten Fall, d. h. ohne Fördermittel aber mit der Vergleichsmietpreisdifferenzierung, würde die Handlungsempfehlung in etwa der des Szenarios V\_FREI entsprechen. Beide Instrumente in Kombination führen zu einer Beschränkung des Primärenergiebedarfs auf  $50 \text{ kWh/m}^2\text{a}$ . Damit werden die Bedingungen für das dritte Vergleichsmietpreinsniveau gerade erreicht und gleichzeitig die Mindestanforderungen an den KfW-Effizienzhaus-Standards 100 leicht übererfüllt. Im Analysezeitraummittel können die Mieteinnahmen durch die Maßnahmen um ca.  $5.300 \text{ €/a}$  gegenüber der Unterlassungsalternative gesteigert werden.

Im Gegensatz zur Eigennutzerfallstudie ist für die Vermieterentscheidung aus dem Vergleich der Szenarien V\_FREI und V\_INST zu resümieren, dass Modernisierungen stärker an den Erfordernissen zur Instandhaltung des betrachteten Gebäudes orientiert werden sollten. Zwar wäre auch ohne direkten Handlungszwang die Umsetzung von einigen Maßnahmen für den Vermieter vorteilhaft, allerdings weichen vor allem die Empfehlungen zur Gestaltung der Wärmeversorgung stark von denen im Falle einer umfassenden Gebäudeinstandsetzung ab. Mit Blick auf die geringe Endwertdifferenz zwischen den beiden Szenarien wäre somit anzuraten, Modernisierungsmaßnahmen nur im Zusammenhang mit der Außenhülleninstandsetzung vorzunehmen. Eine Ausnahme bilden gegebenenfalls die Dämmungen an der Kellerdecke und der Warmwasserzirkulation, die weitgehend unabhängig von den anderen Maßnahmen erfolgen könnten.

Die wirtschaftlich vertretbare Grenze der Primärenergiebedarfsreduktion für den Vermieter zeigen die Ergebnisse des Szenarios V\_MPEB. Mit den getroffenen Annahmen wird hier ein Bedarfswert von  $42,3 \text{ kWh/m}^2\text{a}$  erreicht. Die dafür gegenüber dem Szenario V\_INST zusätzlich erforderlichen Anfangsauszahlungen betragen lediglich  $17.500 \text{ €}$ . Ebenso fällt der Endwert mit  $7.000 \text{ €}$  nur unwesentlich geringer aus, wobei dieser in beiden Szenarien einen relativ hohen Anteil gebundener Restwerte von Maßnahmen mit über den Analysehorizont hinausreichenden Nutzungsdauern beinhaltet. Die mittlere Steigerung der jährlichen Mieteinnahmen im Szenario V\_MPEB im Vergleich zur Unterlassungsalternative beläuft sich auf  $5.050 \text{ €}$ . Sie liegt damit

etwas unterhalb der Steigerung im Szenario V\_INST. Ein Grund ist darin zu sehen, dass der Effekt des Mietspiegels bereits im Szenario V\_INST vollständig ausgeschöpft wird. Für eine zusätzliche Reduktion des Primärenergiebedarfs unter  $50 \text{ kWh/m}^2\text{a}$  bietet er keine Anreize. Solche könnten durch eine zunehmend feingliedrigere Staffelung des Mietspiegels mit steigenden Anforderungswerten an die Primärenergiebedarfsbeschränkung aber gesetzt werden. Gleichzeitig wirkt sich die Forderung zur Warmmietenneutralität negativ aus, denn trotz der Primärenergiebedarfssenkung erhöhen sich im Szenario V\_MPEB gegenüber dem Szenario V\_INST die Energiekosten der Mieter. Dies ist sowohl auf den Wegfall des Stromsondertarifs für den Wärmepumpeneinsatz als auch auf den verstärkten Einsatz der Solarthermie zurückzuführen. Zwar beinhalten beide Technologien ein hohes Potenzial zur Modernisierungsumlage, letztere wird aber vorgabegemäß auf die mittlere Kostenreduktion für die Bestandsmieter in den ersten drei Jahren nach der Maßnahmenumsetzung beschränkt.

Mit dieser Warmmietenneutralitätsprämisse sollen die wirtschaftlichen Belange der Bestandsmieter bei der Maßnahmenwahl Berücksichtigung finden. Unter Umständen könnte sie jedoch durch den Mietspiegeleffekt ausgehebelt werden. Hierfür sind die regulären Mietpreisanpassungen nach § 558 BGB verantwortlich, welche auch ohne eine Modernisierung möglich sind und deshalb bei der Betrachtung der Warmmietenneutralität außen vor bleiben. Da sich auf Grundlage des Mietspiegels die Bezugsbasis für den ortsüblichen Vergleichsmietpreis in Abhängigkeit vom energetischen Gebäudezustand ändert, wird die Modernisierungsumlage durch die zusätzlichen Mietsteigerungsmöglichkeiten substituiert. Im vorliegenden Fall lässt sich damit die Vorteilhaftigkeit der Maßnahmen für den Vermieter trotz der verhältnismäßig geringen Modernisierungsumlagen erklären. Letztere schwanken in den Szenarien zwischen 2,4 und 6 % der anrechenbaren Auszahlungen und bewegen sich damit deutlich unterhalb der laut Gesetzestext zulässigen 11 % pro Jahr. Nachteilig für die Bestandsmieter wirkt sich dieser Effekt jedoch nur im Szenario V\_FREI aus, indem die höheren Nettomieten im Vergleich zur Mietpreisentwicklung des Gebäudeausgangszustands die Reduktion der umlagefähigen Kosten kontinuierlich übersteigt. Die Ergebnisse der anderen beiden Szenarien zeigen dagegen, dass sich selbst umfangreiche Modernisierungen sowohl für den Vermieter als auch für die Mieter des betrachteten Gebäudes wirtschaftlich gestalten lassen. Hier werden die zusätzlichen Mieterhöhungen durch die Reduktion der laufenden Auszahlungen ab dem dritten Jahr nach der Modernisierung überkompensiert.

Abschließend ist noch anzumerken, dass die stromerzeugenden Anlagen in keinem der Vermieterszenarien Teil der besten Handlungsalternative sind. Der Grund ist in den veranschlagten Lieferpreisen für die Mieter zu sehen. Ein wirtschaftlicher Betrieb der Anlagen wäre unter den getroffenen Annahmen aber möglich.

## 7.3 Kritische Würdigung des Analyseansatzes

Bevor die nächsten Unterkapitel einen Ausblick auf weitere Einsatzmöglichkeiten und die Entwicklungspotenziale von *BRIAMO* geben, wird der entwickelte Analyseansatz an dieser Stelle zunächst einer kritischen Reflexion unterzogen. In diesem Zusammenhang werden Grenzen des Modells aufgezeigt und auch mögliche Kritikpunkte hinsichtlich der gewählten Methodik angesprochen. Ebenfalls wird auf verschiedene vernachlässigte bzw. nur vereinfacht berücksichtigte Aspekte der Modernisierungsentscheidung eingegangen, wobei auch Erkenntnisse aus der beispielhaften Modellanwendung in diese Schlussfolgerungen mit einfließen.

### 7.3.1 Zur Erfassung der ökonomischen Konsequenzen aus der Gestaltung des Gebäudeenergiesystems

Der wirklichkeitsnahen Abbildung physikalischer und technischer Interdependenzen eines Gebäudeenergiesystems und der daraus ableitbaren ökonomischen Konsequenzen sind im Rahmen einer linearen Optimierungsproblemformulierung natürlich Grenzen gesetzt. Das beginnt mit der fixierten Vorgabe der Effizienz für die modellierten Energieumwandlungsprozesse der Versorgungsanlagen, welche in der Regel eine hohe Abhängigkeit zum Anlageneinsatz aufweist. Letzterer ist bei der vorgesehenen Analysemethodik Teil der Problemlösung, sodass die Umwandlungsverluste und damit der Gebäudeenergiebedarf gegebenenfalls etwas über- oder unterschätzt werden. Zwar bietet das Modell Ansatzpunkte, diesen Zusammenhang wesentlich detaillierter zu betrachten, allerdings nur unter Inkaufnahme einer deutlichen Steigerung der Problemkomplexität. Vorstellbar wäre bspw. die Modellierung mehrerer alternativer Umwandlungsprozesse für eine Versorgungsanlage mit verschiedenen Wirkungs- bzw. Nutzungsgraden, welche in Abhängigkeit der Anlagenauslastung die Energiebereitstellung innerhalb eines bestimmten Zeitraums widerspiegeln.

Ein ähnliches Problem besteht bei der Erfassung der Instandhaltungsauszahlungen für die Versorgungsanlagen, die ebenfalls stark durch ihren Einsatz beeinflusst werden können, wie bspw. bei einer KWK-Anlage. Hier bietet das Modell zumindest die Möglichkeit, spezifische Kostensätze auf den Output der Anlagen zu beziehen und somit eine Abhängigkeit zum Anlageneinsatz herzustellen. Zu beachten ist, dass dadurch die Zeitpunkte einzelner Instandhaltungsauszahlungen leicht verfälscht werden können, sofern sie erst nach dem Erreichen einer gewissen Einsatzdauer aggregiert anfallen.

Ein weiterer relevanter Aspekt für die ökonomische Bewertung der Systemgestaltung ist die Erfüllung der energetischen Anforderungen zur Bewilligung der staatlichen Zuschüsse und Darlehenszinsverbilligungen. In der Praxis ist die Einhaltung der

Anforderungswerte anhand von Norm-Berechnungsverfahren nachzuweisen. Zwar ist es möglich, die Bedarfsermittlung auf Grundlage des Energieflussgraphen hieran anzunähern, in der Regel wird sie aber zu mehr oder weniger abweichenden Werten führen. Die flexible Abbildungsmethodik und Parametrierung des entwickelten Modells erlaubt es jedoch nicht nur dieser Diskrepanz Rechnung zu tragen, sondern generell die Bestimmung der Förderanforderungswerte und des Gebäudeenergiebedarfs weitgehend voneinander zu trennen. Diese Vorgehensweise ist erforderlich, wenn der erwartete mittlere Energieverbrauch des Gebäudes stark vom Normbedarf abweicht, welcher mit standardisierten Rahmenbedingungen zu berechnen ist. So ist es möglich, bspw. durch die Vorgabe fallspezifisch angepasster Primärenergiefaktoren und Grenzwerte zur Förderbewilligung oder durch Vorgabe von nicht in der Primärenergiebilanz berücksichtigten Energienutzungen, den monetär erfassten Energiebedarf an dem erwarteten durchschnittlichen Energieverbrauch zu orientieren, während die endogene Überprüfung zur Fördermittelbewilligung an die Bedingungen des Normnachweises angenähert wird.

Abschließend ist hinsichtlich der Energiebedarfsermittlung im Modell noch darauf zu verweisen, dass „zahlungsneutrale“ Maßnahmen in Form von Nutzerverhaltensänderungen nicht sinnvoll in die Analyse einbezogen werden können. Ein Beispiel für eine solche Maßnahme mit durchaus beachtlichem Energieeinsparpotenzial wäre die Absenkung der mittleren Raumtemperatur während der Heizperiode.

### **7.3.2 Zum Bewertungsverfahren „Vollständige Finanzplanung“**

Mögliche Ansatzpunkte für Kritik bietet auch das gewählte ökonomische Bewertungsverfahren der vollständigen Finanzplanung. Zwar erlaubt dieses Verfahren eine sehr detaillierte Berücksichtigung der Rahmenbedingungen eines Entscheidungsträgers, allerdings sind in der Regel zahlreiche Vereinfachungen und Beschränkungen seines realen ökonomischen Handlungsspielraums erforderlich, um das Verfahren handhabbar zu gestalten. Die entsprechenden Gültigkeitsprämissen für das *BRIAMO*-Modell sind in Abschnitt 4.6.3 <sup>S. 102</sup> ausführlich dargelegt.

Der Einsatz einer vollständigen Finanzplanung für den entwickelten Analyseansatz begründet sich in erster Linie durch die Zielstellung, die differenzierte staatliche Modernisierungsförderung in Form von verschiedenen Zuschüssen und Darlehenszinsverbilligungen adäquat in die Entscheidungsfindung einzubeziehen. Hierfür ist eine aufgeschlüsselte Gegenüberstellung von einzelnen Modernisierungsmaßnahmen und verschiedenen Finanzierungsvarianten erforderlich, da die Zugriffsmöglichkeiten auf die geförderten Fremdmittel sowohl vom Umfang als auch der Zusammenstellung des Maßnahmenbündels abhängig sind.

Mit einer vollständigen Finanzplanung kann im Gegensatz zu den klassischen Investitionsrechenverfahren die Finanzierungsseite von Investitionen beliebig detailliert betrachtet werden. Gerade dieser hohe Detailgrad bietet jedoch die größte Angriffsfläche für Kritik [117<sup>S. 128</sup>/140<sup>S. 248</sup>]. Diese Kritik ist berechtigt, wenn eine Entscheidung für mehrere Investitionsobjekte zu treffen ist und bei der Bestimmung ihrer Finanzierungsstruktur die Interdependenzen zwischen ihnen und den jeweiligen Finanzierungsmaßnahmen nicht ausreichend erfasst werden. Zu diskutieren ist, inwiefern sie auf das entwickelte Analyseinstrument vor dem Hintergrund der oben erwähnten Beschränkungen zutrifft.

Mit dem entwickelten *BRIAMO*-Modell wird die Modernisierungsentscheidung für ein Gebäude im Rahmen einer Programmplanung untersucht, in welcher alle relevanten Wechselwirkungen zwischen der Auswahl und Ausprägung der Systemgestaltungsoptionen, ihrem Einsatz und der Maßnahmenfinanzierung berücksichtigt werden können. Hinsichtlich alternativer Investitionsmöglichkeiten des Eigentümers, welche nicht die Gebäudemodernisierung betreffen, handelt es sich jedoch um einen partiellen Bewertungsansatz. Das sich daraus ergebende Potenzial für eine Interdependenzproblematik ist allerdings eher schwach ausgeprägt.

Einerseits sollte üblicherweise davon ausgegangen werden können, dass zumindest im Wohngebäudebereich keine relevanten Wechselwirkungen zwischen dem betrachteten Gebäude und anderen Investitionsalternativen bestehen. Andererseits kann auch die geförderte Fremdmittelinanspruchnahme losgelöst von Investitionsalternativen untersucht werden, da diese Mittel ausschließlich objektspezifisch und zweckgebunden bewilligt werden. Letzteres gilt für ungeforderte Hypothekendarlehen zwar nicht, allerdings werden auch diese Darlehen von natürlichen Personen, auf deren Entscheidungsunterstützung *BRIAMO* in erster Linie ausgerichtet ist, vorrangig für Finanzierungen im Zusammenhang mit dem Gebäude eingesetzt. Dagegen könnte die fixe Vorgabe des Mittelbudgets seitens des Eigentümers kritischer beurteilt werden. Der Einsatz dieser Mittel für das Gebäude lässt sich jedoch über den vorzugebenden Verzinsungsanspruch beeinflussen. Im Falle der Instandhaltungsrücklage einer Wohnungseigentümergeinschaft wäre sogar eine Zweckgebundenheit zumindest für den Instandsetzungsanteil an der Modernisierung gegeben.

Letztendlich ist eine durchaus berechtigte Kritik nicht zu entkräften. Diese betrifft die separate Liquiditätsbeurteilung innerhalb des Analysezeitraums, welche auf den abgesteckten Bewertungsrahmen beschränkt bleibt. Gegebenenfalls ebenso kritisch hinterfragt werden könnte die Budgetfestlegung zur kurzfristigen Ergänzungsfinanzierung. In diesem Zusammenhang ist auch darauf zu verweisen, dass der reale Handlungsspielraum bezüglich Fremdmittelbeschaffung und Kapitalanlagen aufgrund der nahezu unbegrenzten Möglichkeiten natürlich nicht umfassend Berücksichtigung

finden kann. Nochmals zu betonen ist ebenfalls, dass die Grenze der vorgesehenen Modellanwendbarkeit überschritten wird, wenn neben der Modernisierung auch der Verkauf oder die Umnutzung der Immobilie als Handlungsalternativen innerhalb des Analysezeitraums in die Entscheidungsfindung einbezogen werden sollen.

### **7.3.3 Zur Berücksichtigung von Steuern**

Hinsichtlich der Vorgehensweise zur Steuerberücksichtigung innerhalb des Bewertungsschemas sind zwei eventuell kritisch zu beurteilende Punkte zu benennen. Zur Ermittlung der Einkommensteuer kann zwar für jeden separat betrachteten Eigentümer ein individueller Steuersatz vorgegeben werden, dieser wird jedoch als konstant angenommen. Damit wird vereinfachend unterstellt, dass der Steuersatz unabhängig von der Bemessungsgrundlage ist, was aufgrund der Einkommensteuerprogression aber nicht immer gegeben sein muss. Unproblematisch ist diese Vereinfachung, wenn für den Eigentümer der Spitzensteuersatz relevant ist und für jedes mögliche Maßnahmenbündel auch relevant bleibt. Beeinflusst die Maßnahmenwahl dagegen die steuerliche Bemessungsgrundlage derart, dass die Progressionszonen tangiert werden, führt diese Vereinfachung zu einer fehlerhaften Steuerermittlung.

Der zweite steuerrelevante Kritikpunkt betrifft den innerhalb des Bewertungsschemas möglichen Verlustausgleich, welcher im Rahmen der Eigennutzerfallstudie die Entscheidung zum Einsatz der stromerzeugenden Anlagen fördert und auch die Wahl ihrer Anfangsfinanzierung (vorrangig Fremdkapital) maßgeblich beeinflusst. In praxi ist ein solcher Verlustausgleich zwar prinzipiell zulässig, allerdings muss hierfür eine grundsätzliche Gewinnerzielungsabsicht durch die Investition unterstellt werden können. Beide Anlagen erreichen bei der beispielhaften Modellanwendung jedoch keinen steuerbaren Gewinn innerhalb des Analysezeitraums.

Wie in den Schlussfolgerungen zu den Ergebnissen bereits dargelegt, ist dieser Umstand für die PV-Anlage im vorliegenden Fall weniger kritisch zu sehen, als für die KWK-Anlage. Aber auch für Letztere lässt sich der Kritikpunkt zumindest für die betrachtete Entscheidungssituation mit folgender Überlegung entkräften. Diese besteht darin, dass die gewinnmindernden Auszahlungen für die Instandhaltung, welche vereinfachend konstant über die gesamte Nutzungsdauer auf den Anlagenoutput bezogen sind, ja nur zur Erhaltung der Anlagenbetriebsfähigkeit getätigt werden und deshalb im letzten Nutzungsjahr nicht mehr in voller Höhe anfallen. Bei Vernachlässigung dieser Auszahlungen würde die KWK-Anlage einen steuerbaren Gewinn im letzten Analysejahr erwirtschaften, womit die Anforderung an die Gewinnerzielungsabsicht erfüllt ist. Auch wenn diese im Rahmen der beispielhaften Modellanwendung erkannte Problematik keinen Einfluss auf die Ergebnisse der

durchgeführten Fallstudien hat, könnte sie für andere zu untersuchende Modernisierungsentscheidungen unter Umständen zu unzulässigen oder zumindest aus steuerrechtlicher Sicht kritisch zu beurteilenden Handlungsempfehlungen führen. Aus diesem Grund wird sie im Unterkapitel zu den methodischen Weiterentwicklungsmöglichkeiten von *BRIAMO* nochmals aufgegriffen.

## 7.4 Weitere Einsatz- und Analyseoptionen von *BRIAMO*

Das entwickelte *BRIAMO*-Modell ist vorrangig auf die Entscheidungsunterstützung zur energetischen Wohngebäudemodernisierung von selbstnutzenden Eigentümern bzw. Vermietern aus dem nicht unternehmerischen Bereich ausgerichtet. Prinzipiell könnte das Modell aber auch für Wohnungsunternehmen zur Entscheidungsvorbereitung genutzt werden, sofern die detaillierte Modernisierungsplanung für ein Gebäude im Vordergrund steht und die angesprochenen Modellgrenzen dabei akzeptabel sind.

Weiterhin beschränkt sich der Einsatz von *BRIAMO* nicht nur auf reine Wohngebäude. Die Freiheitsgrade bei der Modellierung des Energieflussgraphen und der ökonomischen Rahmenbedingungen bieten weitreichende Möglichkeiten, auch die entscheidungsrelevanten Gegebenheiten für Wohngebäude mit Mischnutzungen (bspw. mit Kleingewerbe) oder für verschiedene rein gewerblich genutzte Gebäude adäquat zu erfassen.

Ergänzend zum Untersuchungsumfang der vorgestellten Fallstudien bietet *BRIAMO* einige zusätzliche Analyseoptionen, mit denen die Betrachtung der Entscheidungssituation sowohl aus praxisrelevanter als auch aus theoretischer Sicht erweitert werden kann. Dazu zählen die bereits im Kapitel zur Modellentwicklung angesprochene Berücksichtigung von Darlehenssondertilgungen und von Standardsprüngen im Mietbereich sowie die in der Vergangenheit immer wieder diskutierte steuerliche Anrechenbarkeit von Modernisierungen für Selbstnutzer.

Darüber hinaus ist das Modell bereits darauf ausgelegt, mehrere Gebäude gleichzeitig in die Untersuchung einzubeziehen. Dieser Anwendungsfall ist zwar auf eine sehr geringe Anzahl von Gebäuden beschränkt, eröffnet jedoch die Möglichkeit, zusätzlich zentrale Versorgungsanlagen innerhalb eines kleinen räumlich zusammenhängenden Gebäudeverbunds zu betrachten.

Ferner wäre es vorstellbar, den Betrieb von stromerzeugenden Anlagen in den Untersuchungsfokus zu rücken und in diesem Rahmen verschiedene Betreiberkonzepte einander gegenüberzustellen. In diesem Zusammenhang können bei der Untersuchung warmmietenneutraler Modernisierungen bspw. auch die Kosten für die private Stromnutzung der Mieter berücksichtigt werden.

Letztendlich erlaubt das *BRIAMO*-Modell, neben den energetischen Maßnahmen auch nichtenergetische Modernisierungen in die Entscheidungsfindung einzubeziehen. Diese Analyseoption ist für die Modellanwendung im Mietbereich interessant, da Maßnahmen, wie bspw. eine Badmodernisierung, ebenfalls hohe Auszahlungen erfordern und gleichzeitig die Mietpreisbildung beeinflussen können. Somit ist es möglich, die Vorteilhaftigkeit von energetischen Modernisierungen im direkten Vergleich mit nichtenergetischen Modernisierungen zu beurteilen.

## 7.5 Ansatzpunkte für die Modellweiterentwicklung

Das *BRIAMO*-Modell ermöglicht in der vorstellten Form bereits eine sehr umfassende wirtschaftliche Beurteilung von Gebäudemodernisierungen. Im Folgenden werden einige Ansatzpunkte für die methodische Weiterentwicklung des Analyseinstrumentes aufgezeigt.

Der erste Ansatzpunkt betrifft die im Abschnitt 7.3.3<sup>s. 227</sup> angesprochene mögliche Problematik bezüglich des steuerlichen Verlustausgleichs für die Bewirtschaftung von KWK- und PV-Anlagen. Um zu vermeiden, dass dieser Modellfreiheitsgrad für Handlungsempfehlungen „missbraucht“ wird, die aus steuerrechtlicher Sicht nicht mehr zu vertreten sind, wäre eine zusätzliche Nebenbedingung zu formulieren, welche die Erwirtschaftung von mindestens 1 € Gewinn innerhalb des Analysezeitraums im Falle des Anlagenbetriebs fordert. Auf diese zusätzliche Einschränkung kann allerdings verzichtet werden, wenn die Anlage zwar innerhalb des Analysezeitraums ausschließlich Verluste erzielt, jedoch jenseits des Analysehorizontes zumindest das Potenzial aufweist, ein positives Ergebnis bei der Gewinneinkünfteermittlung zu erreichen.

Ein möglicher Ansatzpunkt zur Erweiterung des technischen Handlungsspielraums bietet sich bspw. hinsichtlich der Modellierung von saisonalen Wärme- bzw. Kältespeichern. Diese Systemgestaltungsoption könnte zwar prinzipiell auch mit den vorgestellten Nebenbedingungen für die thermischen Kurzzeitspeicher abgebildet werden, allerdings nur, wenn bei der Festlegung der unterjährigen Modellzeitstruktur auf eine Aggregationen in Form von Typwochen und Typtagen verzichtet wird. Aus Gründen der Modellkomplexität wird dies in der Regel aber nicht möglich sein. Somit wäre eine zusätzliche Verknüpfung zwischen den Typwochen zur Übertragung der Speicherfüllstände herzustellen.

Die Regelungen des EEWärmeG sind nicht in die vorgestellte Modellentwicklung eingeflossen. Prinzipiell wäre aber auch eine dahin gehende Erweiterung des Analyseinstrumentes denkbar, sofern zukünftig entsprechende Anforderungen auch an bestehende Wohngebäude gestellt werden oder die landesspezifischen Regelungen des

EWärmeG in Baden-Württemberg Berücksichtigung finden sollen. Allerdings stellt die Prüfung der Vorgabeneinhaltung mit Blick auf die verschiedenen Energieträgeroptionen und Ersatzmaßnahmen und vor allem die Kombinationsmöglichkeiten anteilig erfüllter Einzelbedingungen eine nicht zu unterschätzende Herausforderung dar. Umfassend wäre dieser Handlungsspielraum nur mit einer erheblichen Steigerung der Problemkomplexität in die Analyse einzubeziehen. Durch eine Implementierung dieser Regelungen ließe sich der Anwendungsbereich des Ansatzes aber auch auf die energetische Neubauplanung ausweiten.

Nicht zuletzt bietet *BRIAMO* das Potenzial, auch die Auswirkungen geänderter Mietpreisbildungsregeln auf die Modernisierungsentscheidung des Vermieters und die ökonomische Belastung der Mieter zu analysieren. Derartige alternative Konzepte, wie bspw. das sogenannte Teilwarmmietenkonzept, werden bereits seit vielen Jahren unter dem Schlagwort „Vermieter-Mieter-Dilemma“ in verschiedenen Studien untersucht [132/167/203].

# Kapitel 8

## Zusammenfassung

Mit der nationalen Energiewende strebt Deutschland in den nächsten 35 Jahren eine nachhaltige Umgestaltung seiner Strukturen zur Energieversorgung und -nutzung an. Dabei ist der Gebäudesektor ein schwerpunktmäßiges Handlungsfeld, um die anspruchsvollen politischen Zielsetzungen zur Reduktion der Treibhausgasemissionen und des Energiebedarfs zu verwirklichen. Der Hauptanteil des Sektorbeitrags muss durch die energetische Modernisierung des Gebäudebestands realisiert werden. Hier sind die staatlichen Einflussmöglichkeiten auf Grundlage ordnungsrechtlicher Vorgaben durch den Bestandschutz allerdings eingeschränkt und können deshalb nur im Zusammenhang mit wesentlichen Änderungen und Instandsetzungen am Gebäude greifen. Die Entscheidung zum Umsetzungszeitpunkt und Umfang von Modernisierungen liegt allein beim Eigentümer. Für ihn stellt die ökonomische Vorteilhaftigkeit der Maßnahmen dabei ein wichtiges Beurteilungskriterium dar.

Um die energetische Modernisierung des Gebäudebestands voranzutreiben, wurden in den vergangenen Jahren ergänzend zum ordnungsrechtlichen Rahmen zahlreiche Förderinstrumente ins Leben gerufen. Gleichzeitig hat sich im Zuge dieser politischen Anstrengungen eine breite Palette an effizienten Energieversorgungstechnologien, neuen Baustoffen und Bauelementen am Markt etabliert. Dem Gebäudeeigentümer bietet sich somit ein beachtlicher Handlungsspielraum zur technischen und finanziellen Gestaltung von Modernisierungsmaßnahmen.

Die gängige Praxis der Modernisierungsplanung wird diesem Umstand oftmals nur unzureichend gerecht. In der Regel werden Einzelmaßnahmen isoliert betrachtet oder es wird eine vergleichende Gegenüberstellung weniger Maßnahmenbündel vorgenommen. Maßnahmenwahl und Finanzierungsentscheidung erfolgen sukzessiv. Die ökonomische Beurteilung beschränkt sich auf eine Wirtschaftlichkeitsprüfung. Neben diesen vereinfachten Bewertungsansätzen wird in der Literatur eine Vielzahl an Modellen vorgestellt, welche die Methoden des Operations Research nutzen. Sie sind prinzipiell in der Lage, den technischen Handlungsspielraum und die monetären

Konsequenzen umfassend in die Entscheidungsfindung einzubeziehen und die vorteilhafteste Handlungsalternative hinsichtlich verschiedener Zielvorgaben für den Gebäudeeigentümer zu ermitteln. Jedoch ist festzustellen, dass mit diesen Modellen ausschließlich die Eigennutzerperspektive eingenommen wird und die Entscheidungssituation eines Vermieters unbeachtet bleibt. Ebenso werden Aspekte wie die Maßnahmenfinanzierung im Zusammenhang mit der Inanspruchnahme von Fördermitteln, Steuern oder die Bewirtschaftung stromerzeugender Anlagen bislang nur stark vereinfacht oder gar nicht berücksichtigt.

Um einen Beitrag zur Schließung dieser Lücke zu leisten, wird in der vorliegenden Arbeit das *BRIAMO-Modell (Building Refurbishment Investment Advising by Mathematical Optimization)* entwickelt. Ausgangspunkt ist die Zielstellung zur Erarbeitung einer Methode, welche den techno-ökonomischen Handlungsspielraum bei der Modernisierungsplanung umfassend abbilden und daraus optimale Handlungsempfehlungen für Wohngebäudeeigentümer sowohl aus der Eigennutzer- als auch aus der Vermieterperspektive unter ökonomischen Gesichtspunkten bestimmen kann. Eine wesentliche Anforderung besteht darin, die Entscheidung zur Maßnahmenfinanzierung vor dem Hintergrund der breit gefächerten staatlichen Förderlandschaft simultan zur Maßnahmenwahl und zur Bestimmung des Versorgungsanlagen-einsatzes in die Analyse einzubeziehen. Dabei ist der Möglichkeit zur detaillierten Betrachtung von Bewirtschaftungsoptionen für stromerzeugende Anlagen besondere Aufmerksamkeit zu widmen. Ebenso sollen die steuerlichen Auswirkungen für die Betreiber dieser Anlagen und für den Fall der Vermieterentscheidung Berücksichtigung finden.

Als Einstieg in die Thematik werden zunächst die Hintergründe für die dem Gebäudesektor beigemessene Bedeutung im Rahmen der Energiewende beleuchtet. Hierfür wird auf die Energieverbrauchs-, die Größen- und die Altersstruktur des deutschen Wohngebäudebestands sowie auf dessen energetischen Status Quo eingegangen. Darauf aufbauend werden die Gebäudeeigentümerstruktur sowie wesentliche Motive und Hemmnisse der Eigentümer für die Umsetzung von energetischen Modernisierungsmaßnahmen betrachtet.

In der Folge werden grundlegende physikalisch-technische Aspekte der Energienutzung in Wohngebäuden mit Relevanz für die Modernisierungsplanung vorgestellt. In diesem Zusammenhang wird ein kurzer Überblick zu verschiedenen Energietechnologien gegeben – angefangen bei konventionellen Versorgungsoptionen wie Heizkessel und Fernwärme bis hin zu Wärmepumpen und solarthermischen Anlagen, welche die am Gebäudestandort verfügbaren regenerativen Energiequellen nutzen. Ebenso wird auf technische Handlungsoptionen und wesentliche Aspekte zur objekt-internen Stromerzeugung, zur Energiespeicherung und Wärmeverteilung sowie auf

Maßnahmen zur Reduktion des Heizwärmebedarfs als die dominierende Energieanwendung in Wohngebäuden eingegangen.

Der sich daran anschließende Überblick zu den rechtlich-ökonomischen Rahmenbedingungen der Gebäudemodernisierung beinhaltet energierechtliche Vorgaben und ökonomische Anreize von staatlicher Seite. Ebenso wird auf Regelungen des Mietrechts sowie der Einkommen- und Umsatzbesteuerung eingegangen, welche für die Umsetzung von Modernisierungsmaßnahmen und die Bewirtschaftung stromerzeugender Anlagen relevant sein können.

Die Vorüberlegungen zur Modellentwicklung werden mit einer Charakterisierung der Entscheidungssituation „Wohngebäudemodernisierung“ hinsichtlich ihrer ökonomischen, technischen und zeitlichen Aspekte eingeleitet. Damit wird gleichzeitig der Handlungsspielraum aufgespannt, welcher durch das Planungsinstrument zu erfassen ist. Die Vielzahl der Handlungsoptionen und die bestehenden Wechselwirkungen zwischen ihnen und den Rahmenbedingungen des Entscheidungsträgers verdeutlichen, dass es sich um eine komplexe Planungsaufgabe handelt.

In der methodischen Diskussion zur Modellentwicklung kristallisiert sich die Eignung eines Energieflussgraphen zur adäquaten Abbildung des Gebäudeenergiesystems heraus. Hierbei handelt es sich um eine Modellierungsmethode, die sich bereits seit vielen Jahren bei Analyse überregionaler und lokaler Energieversorgungsstrukturen bewährt. Mit ihr können die Wirkungsweisen und Interdependenzen der verschiedenen alternativen oder kombinierbaren Maßnahmenoptionen zur Modernisierung entlang der gebäudeinternen Versorgungskette in zweckmäßiger Weise erfasst werden. Die Auswahl und Auslegung der vorzugebenden Maßnahmenoptionen sowie der Einsatz der Energieversorgungsanlagen stellen Entscheidungsgrößen des Modells dar. Ihre Bestimmung ist auf die Befriedigung der Nachfrage nach Raumwärme und gegebenenfalls -kühlung, Warmwasser und elektrischer Energie im Gebäude ausgerichtet.

Zur Erfassung der monetären Konsequenzen aus der Gestaltung des Gebäudeenergiesystems bietet sich die vollständige Finanzplanung als geeignetes Bewertungsverfahren an. Sie ermöglicht es, die Maßnahmenfinanzierung durch staatliche Fördermittel in Form verschiedener Zuschüsse und zinsverbilligter Kreditvarianten detailliert in die Entscheidungsfindung einzubeziehen. Um die vorteilhafteste Handlungsalternative zu bestimmen, wird die Entscheidungssituation als gemischt-ganzzahliges lineares Optimierungsproblem formuliert. Die Bestimmung der Handlungsempfehlungen kann dabei alternativ an den Gewinnzielgrößen „Einkommen“ oder „Vermögen“ oder an der Zielsetzung „Minimierung des Gebäudeprimärenergiebedarfs“ ausgerichtet werden. Für Letztere beschränkt mindestens die Finanzierbarkeit der Maßnahmen die Ausschöpfung ihres technischen Potenzials zur Energiebedarfsreduktion.

Zentrum und Schwerpunkt der Arbeit bildet die Beschreibung des Restriktionensystems für das *BRIAMO*-Modell. Hierfür werden zunächst grundlegende Festlegungen zur Abbildung der Energiesystemstruktur des Gebäudes, zur Strukturierung des Analysezeitraums und zur Erfassung der Eigentümer- und Finanzplanstruktur getroffen. Darauf aufbauend erfolgt die Erarbeitung der erforderlichen Nebenbedingungen u. a. zur Beschreibung der technischen Funktionsweise der einzelnen Maßnahmenoptionen und der Wirkungsketten im Energieflussgraphen, zur Abbildung der Fremdfinanzierungsmöglichkeiten und der Regelungen zur Mietpreisbildung sowie zur Erfassung der monetären Kenngrößen in den Finanzplankonten.

Mit dem Ziel, die Anwendung und praktische Relevanz des entwickelten Analyseinstruments zu demonstrieren, wird das *BRIAMO*-Modell im Anschluss an die formale Beschreibung in zwei beispielhaften Fallstudien zur Modernisierungsplanung für ein Mehrfamilienhaus mit 12 Wohneinheiten angewandt. In der ersten Fallstudie wird die Perspektive von Eigennutzern in Form einer Wohnungseigentümergeinschaft eingenommen. Die zweite Fallstudie fokussiert dagegen auf die Entscheidungsfindung eines Vermieters des Wohngebäudes unter den Rahmenbedingungen eines Mietspiegels mit einer Differenzierung der Vergleichsmietpreise anhand des Gebäudeprimärenergiebedarfs und der Forderung, dass innerhalb von drei Jahren nach Maßnahmenumsetzung die Warmmietenneutralität für die Mieter erreicht wird. Neben verschiedenen rein wärmebezogenen Maßnahmen in den Bereichen Erzeugung, Speicherung, Verteilung und thermische Gebäudehülle wird auch die Option zur Bewirtschaftung einer stromerzeugenden Anlage betrachtet.

Die Modernisierungsentscheidung wird zunächst für jede Fallstudie in Form von drei Basisszenarien mit verschiedenen Ausgangslagen bzw. Eigentümerzielen analysiert. Während im ersten Basisszenario keine Instandsetzungsarbeiten geplant sind, wird für das zweite Basisszenario unterstellt, dass der Ersatz der vorhandenen Wärmeversorgungsanlagen und der Fenster sowie ein Anstrich der Außenwand unmittelbar anstehen. In beiden Szenarien wird die Vorteilhaftigkeit von Modernisierungsmaßnahmen hinsichtlich der Vermögenswertmaximierung analysiert. Im dritten Basisszenario wird dagegen die maximale Primärenergiebedarfsreduktion bestimmt, die für den Gebäudeeigentümer unter den getroffenen Annahmen gerade noch wirtschaftlich umzusetzen wäre. Für das Basisszenario mit geplanter Instandsetzung werden für beide Fallstudien noch die Auswirkungen einer Variation der unsicheren Entwicklungspfade für die Energiepreise, die Vergleichsmietpreisniveaus und das Zinssatzniveau vorgenommen. Im Folgenden werden einige wesentliche Aussagen zusammenfassend angeführt, die unter den angenommenen Rahmenbedingungen mithilfe des neu entwickelten *BRIAMO*-Modells hinsichtlich einer Modernisierungsplanung für das betrachtete Beispielgebäude getroffen werden können.

Im Falle der Eigennutzung:

- Unabhängig davon, ob erforderliche Instandsetzungsarbeiten unmittelbar anstehen oder nicht, erweist sich die sofortige Umsetzung von Modernisierungsmaßnahmen für die Eigennutzer als vorteilhaft. Der vorgeschlagene Maßnahmenumfang im Falle erforderlicher Instandsetzungsarbeiten ist erwartungsgemäß deutlich größer. Die Reduktion der laufenden Auszahlungen für die Energieversorgung inklusive der privaten Stromnutzung beträgt im Mittel rund 7.650 €/a für das Basisszenario ohne geplante Instandsetzung und ca. 12.000 €/a für das Basis-szenario mit geplanter Instandsetzung. Die Maßnahmen amortisieren sich weitgehend innerhalb des 20-jährigen Analysezeitraums.
- Das wirtschaftlich nutzbare technische Potenzial zur Primärenergiebedarfsreduktion ist beachtlich. Ohne dass sich die Eigentümer gegenüber einer Unterlassung von Modernisierungsmaßnahmen ökonomisch schlechter stellen, könnte der Bedarf des Gebäudes von rund 173 kWh/m<sup>2</sup>a im Ausgangszustand auf ca. 37 kWh/m<sup>2</sup>a nach der Maßnahmenumsetzung gesenkt werden. Der Amortisationszeitraum reicht jedoch weit über den Analysehorizont hinaus. Gleichzeitig wird die enorme Spannweite des Wirtschaftlichkeitsbegriffs verdeutlicht. Ohne geplante Instandsetzungsarbeiten und mit der Entscheidungsausrichtung an dem erreichbaren Vermögenszuwachs beträgt die vorgeschlagene Primärenergiebedarfsreduktion lediglich 40 kWh/m<sup>2</sup>a, allerdings könnte der Vermögensendwert um beinahe 120.000 € gegenüber der Ausschöpfung des wirtschaftlich nutzbaren technischen Potenzials gesteigert werden.
- Die Handlungsempfehlungen werden unter den getroffenen Annahmen von der Vorteilhaftigkeit der Selbstversorgung mit elektrischer Energie dominiert. Die Installation einer PV-Anlage ist unabhängig von den Ausgangsbedingungen und Zielsetzungen der Eigentümer anzuraten. In den beiden Szenarien mit Vermögenswertmaximierung wird zusätzlich der Einsatz einer kleinen KWK-Anlage empfohlen. Mit beiden Anlagen in Kombination könnte bis zu 40 % des privaten und über 85 % des allgemeinen Gebäudestrombedarfs gedeckt werden. Die mittleren kalkulatorischen Kosten der Eigenversorgung betragen im günstigsten Fall für den PV-Strom 23 ct/kWh und für den KWK-Strom 5,6 ct/kWh innerhalb des zehnjährigen Zuschlagzeitraums bzw. 13,3 ct/kWh danach.
- Förderinstrumente der KfW und des BAFA werden in allen Szenarien genutzt. Während das vorgeschlagene Maßnahmenbündel für das Szenario ohne geplante Instandsetzung auch ohne Fördermittel zu empfehlen wäre, wirken sich die staatlichen Zuwendungen in den beiden anderen Szenarien auf den Umfang der energetischen Modernisierung positiv aus.

Im Falle der Vermietung:

- Vor dem Hintergrund der Möglichkeiten zur Mietpreissteigerung auf Grundlage des Mietspiegels, der Prämisse zur warmmietenneutralen Modernisierung und der Verzinsungsansprüche für die alternativen Kapitalanlagen fallen die Endwertdifferenzen zwischen den einzelnen Szenarien und der Unterlassungsalternative mit maximal 34.000 € relativ gering aus. Im Basisszenario ohne geplante Instandsetzung wird das zweite Vergleichsmietpreisniveau gegenüber dem Gebäudeausgangszustand erreicht. Der Primärenergiebedarf des Gebäudes wird auf 100 kWh/m<sup>2</sup>a reduziert. Die zusätzlichen Mieteinnahmen belaufen sich im Mittel auf 3.600 €/a. Im Falle direkt anstehender Instandsetzungsarbeiten ist eine deutliche Ausweitung des Modernisierungsumfangs zu empfehlen. Der Primärenergiebedarf des Gebäudes wird hier auf 50 kWh/m<sup>2</sup>a reduziert. Die Mieteinnahmen können im Mittel um 5.300 €/a gegenüber der Unterlassungsalternative gesteigert werden. Die wirtschaftliche Grenze der Beschränkung des Primärenergiebedarfs liegt bei rund 42 kWh/m<sup>2</sup>a.
- Die im Mietspiegel vorgegebenen Grenzwerte zum Primärenergiebedarf für die verschiedenen Vergleichsmietpreisniveaus dominieren die Entscheidungen zum Modernisierungsumfang. Für das Szenario ohne geplante Instandsetzung ist der Mietspiegeleffekt sogar weitgehend allein für die Zusammenstellung des empfohlenen Maßnahmenbündels verantwortlich. In den anderen beiden Szenarien ergänzen sich dagegen die Einflüsse der staatlichen Förderinstrumente und des Mietspiegels hinsichtlich der erreichten Bedarfsreduktion. Eine Amortisation der jeweils empfohlenen Maßnahmen innerhalb des Analysezeitraums wird allerdings nur im Szenario ohne geplante Instandsetzung erreicht.
- Durch die Warmmietenneutralitätsprämisse wird die Modernisierungsumlage auf die mittlere Reduktion der umlagefähigen Kostenanteile der Energieversorgung innerhalb der ersten drei Jahre nach der Maßnahmenumsetzung beschränkt. Die Umlage schwankt zwischen 2,4 und 6 % der anrechenbaren Auszahlungen und bewegt sich damit unterhalb der zulässigen 11 % pro Jahr. Die Preisstaffelung des Mietspiegels versetzt den Vermieter jedoch in die Lage, die entgangenen Umlagen durch die zusätzlichen Mietsteigerungsmöglichkeiten nach § 558 BGB zu kompensieren. Mit Ausnahme des Szenarios ohne geplante Instandsetzung wirkt sich dieser Effekt nicht negativ auf die wirtschaftlichen Belange der Mieter aus, die mit der Warmmietenneutralitätsprämisse berücksichtigt werden sollten.
- Die veranschlagten Lieferpreise zur Stromversorgung der Mieter würden zwar einen wirtschaftlichen Betrieb einer PV- bzw. KWK-Anlage für den Vermieter erlauben, allerdings sind beide Optionen in keinem Basisszenario ein Bestandteil der vorteilhaftesten Handlungsalternative.

Auch wenn sich allgemeingültige Schlussfolgerungen auf Grundlage der beiden vorgestellten Anwendungsfälle nicht ableiten lassen, können aus den Modellergebnissen Erkenntnisse gewonnen werden, die auch für andere, zumindest ähnlich gelagerte Entscheidungssituationen zur Gebäudemodernisierung zutreffen sollten. Diese können wie folgt zusammengefasst werden:

- Bei Gebäuden mit einem hohen Energiebedarf kann bereits durch kleine Modernisierungsmaßnahmen mit einem relativ geringen monetären Aufwand eine deutliche Bedarfsreduktion erreicht werden. Diese Maßnahmen amortisieren sich innerhalb kurzer Zeiträume, stellen den Eigentümer gegenüber der Maßnahmenunterlassung ökonomisch besser und erfordern deshalb auch keine monetären Anreize von staatlicher Seite. Da die staatlichen Fördermittel unabhängig vom energetischen Gebäudeausgangszustand auch für entsprechende Einzelmaßen bereitgestellt werden, kommt es in diesen Fällen zu einer Überförderung. Um dem entgegenzuwirken, müsste die ökonomische Vorteilhaftigkeit der Maßnahmen für den Eigentümer als Kriterium zur Fördermittelbewilligung erfasst werden.
- Hohe energetische Gebäudestandards erfordern die Kombination verschiedener Energieeffizienzmaßnahmen, die sich gegenseitig beeinflussen und in ihrer Wirksamkeit überlagern. Einerseits wird dadurch das Potenzial der Einzelmaßnahmen zur Energiebedarfsreduktion zunehmend herabgesetzt. Andererseits steigen die erforderlichen Anfangsauszahlungen zum Erreichen besserer energetischer Gebäudestandards zunehmend an. Um monetäre Anreize von staatlicher Seite zur Initiierung umfangreicher Modernisierungsmaßnahmen insbesondere für Eigentümer zu setzen, ist eine Fördermittelstaffelung erforderlich, die diesem Umstand gerecht wird. Ein zusätzlicher Anreiz im Bereich der Gebäudebewirtschaftung sollte dadurch erreicht werden können, dass in Mietspiegeln für bessere energetische Gebäudestandards auch eine zunehmend stärkere Differenzierung der Vergleichsmietpreisniveaus erfolgt.
- Ein niedriges Zinsniveaus, wie es momentan vorherrscht (Stand 2014), sollte sich zwar positiv auf die Initiierung von Modernisierungsmaßnahmen auswirken, allerdings gehen gleichzeitig auch Ansatzpunkte für die staatliche Zinssatzförderung zur Beeinflussung des Umfangs bzw. der Qualität der Modernisierung verloren. Die Aufrechterhaltung des gewünschten Anzeizeffekts der Fördermittelstaffelung in Abhängigkeit des durch die Modernisierung erreichten energetischen Gebäudestandards ist jedoch durch eine Erhöhung der Zuschussbeträge möglich.

Die Fallstudienresultate veranschaulichen, dass das neu entwickelte *BRIAMO*-Modell ein geeignetes Analysewerkzeug zur Entscheidungsvorbereitung im Rahmen der Gebäudemodernisierungsplanung darstellt. Mit der erarbeiteten Methode ist es erst-

mals möglich, die dabei bestehenden technischen und finanziellen Handlungsoptionen des Eigentümers sowie seine individuellen Ausgangs- und Rahmenbedingungen umfassend in die Entscheidungsfindung einzubeziehen und auf dieser Grundlage für ihn optimale Modernisierungsstrategien unter ökonomischen Gesichtspunkten zu bestimmen. Hierin ist der originäre Beitrag der vorliegenden Arbeit zu sehen.

# Anhang

**Tabelle 20:** Finanzplan [€] zum Basisszenario E\_FREI<sup>139</sup>

		Jahr	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	
Jahresanfang	Bestand an liquiden Mitteln		100.000	14.400	14.879	12.956	11.841	12.242	12.552	
	+	Aufnahme Darlehen	KWK-ErgKredit (10/2/10)	19.650						
			KfW 274 (20/3/20)	34.440						
	+	Zuschüsse	KfW 430	3.625						
			BAFA-KWK	2.350						
	-	Instandsetzung & Modernisierung	Maßnahmen exkl. KWK/PV	36.249						
KWK-Anlage			22.000							
PV-Anlage			34.440							
Kapitalanlagen	bis Endjahr	67.376	14.400	14.879	12.956	11.841	12.242	12.552		
	einjährig									
Jahresende	Einlagen <sup>140</sup>		26.300	26.900	27.300	27.900	28.500	29.000	29.500	
	+	Energielieferung & Förderung	Einspeisung KWK-Strom	196	203	212	220	229	238	248
			KWK-Zuschlag	871	871	871	871	871	871	871
			Vermarktung PV-Strom	1.427	1.427	1.427	1.427	1.427	1.427	1.427
	Verzinsung & Auflösung Kapitalanlagen		2.021	2.453	2.900	3.288	3.644	4.011	4.387	
	+	ESt-Gutschrift für Verlustausgleich	KWK-Anlage	120	127	125	119	120	120	112
			PV-Anlage	435	438	441	443	429	413	398
	+	Instandhaltung & Anlagenbetrieb <sup>141</sup>	KWK-Anlage	805	817	828	839	851	862	873
			PV-Anlage	422	428	435	441	448	454	461
			Sonstiges	240	244	247	251	255	258	262
	+	Energiebezug inkl. Grundgebühren	Gas	4.657	4.798	4.870	5.010	5.151	5.292	5.363
			KWK-Gas	3.158	3.287	3.351	3.415	3.545	3.674	3.739
			Strom	4.876	5.003	5.151	5.277	5.425	5.570	5.735
	-	Eigenversorgung/ Privatentnahmen	USt KWK-Wärme	847	866	876	882	896	910	915
			USt KWK-Strom	79	82	85	89	92	96	100
			USt PV-Strom <sup>142</sup>	106	106	106	106	106	106	106
			EEG-Umlage	100	121	142	146	150	155	160
	Zinsen Darlehen	KWK-ErgKredit (10/2/10)	297	297	297	262	226	190	153	
			KfW 274 (20/3/20)	878	878	878	878	836	793	749
	Tilgung Darlehen	KWK-ErgKredit (10/2/10)			2.329	2.365	2.400	2.436	2.473	
			KfW 274 (20/3/20)				1.644	1.686	1.729	1.773
	KapErtrSt		505	613	725	822	911	1.003	1.097	
	Bestand an liquiden Mitteln		14.400	14.879	12.956	11.841	12.242	12.552	12.984	

<sup>139</sup> Einzahlungen (+) und Auszahlungen (-) auf volle Euro gerundet. Zur Szenariodefinition siehe S. 165 ff.

<sup>140</sup> Jährlich aufzubringende Eigenmittel für die Instandhaltungsrücklage sowie für die laufenden Auszahlungen der Instandhaltung und des Anlagenbetriebs (inkl. Energiebezug, Grundgebühren, Versicherungen etc.), falls keine Modernisierungsmaßnahmen umgesetzt werden. Siehe hierzu auch S. 104.

<sup>141</sup> Auszahlungen für Instandhaltung (ggf. inkl. Instandsetzungen nach dem betrachteten Umsetzungszeitpunkt) und für den Anlagenbetrieb ohne Energiebezug und Grundgebühren von externen Lieferanten.

<sup>142</sup> Siehe hierzu die Festlegungen auf S. 180.

(Fortsetzung Tabelle 20)

2022	2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030	2031	2032	2033	2034
12.984	13.474	13.890	0	16.477	16.957	17.527	18.140	18.711	19.377	19.973	20.527	21.212
12.984	13.474	2.827		16.477	16.957	17.527	18.140	18.711	19.377	19.973	20.527	
		11.063										21.212
30.100	30.700	31.400	32.000	32.600	33.300	34.100	34.800	35.500	36.200	37.000	37.700	38.600
258	268	278	290	301	314	326	339	353	367	381	397	412
871	871	871										
1.427	1.427	1.427	1.427	1.427	1.427	1.427	1.427	1.427	1.427	1.427	1.427	1.427
4.777	5.181	16.572	5.266	5.760	6.269	6.795	7.339	7.900	8.482	9.081	9.697	354.767
104	102	101	222	224	225	225	225	217	216	222	212	216
382	365	348	331	313	294	275	256	236	216	194	173	151
885	896	907	919	930	941	953	970	987	1.004	1.021	1.038	1.055
468	475	482	489	497	504	512	520	527	535	543	551	560
266	270	25.685	277	282	286	291	295	300	305	309	314	319
5.504	5.645	5.787	5.928	6.068	6.211	6.420	6.562	6.703	6.845	7.057	7.198	7.409
3.803	3.932	4.060	4.125	4.254	4.384	4.512	4.640	4.705	4.834	5.027	5.092	5.285
5.881	6.045	6.211	6.394	6.558	6.741	6.923	7.123	7.307	7.508	7.726	7.928	8.146
921	935	948	686	705	724	743	763	774	794	823	834	862
104	108	112	117	121	126	131	137	142	148	154	160	166
106	106	106	106	106	106	106	106	106	106	106	106	106
165	169	174	180	185	190	196	202	208	214	221	227	234
115	78	39										
704	658	610	561	511	460	408	354	298	242	183	124	63
2.511	2.549	2.587										
1.818	1.863	1.912	1.961	2.011	2.062	2.114	2.168	2.224	2.280	2.338	2.398	2.459
1.194	1.295	1.377	1.316	1.440	1.567	1.699	1.835	1.975	2.120	2.270	2.424	2.583
13.474	13.890	0	16.477	16.957	17.527	18.140	18.711	19.377	19.973	20.527	21.212	366.326

**Tabelle 21:** Finanzplan [€] zum Basisszenario E\_INST<sup>143</sup>

		Jahr	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	
Jahresanfang	Bestand an liquiden Mitteln		100.000	15.550	16.167	14.796	12.102	9.626	7.266	
	+	Aufnahme Darlehen	KfW 152 (10/2/10)	129.997						
			KWK-ErgKredit (10/2/10)	18.401						
			KfW 274 (20/3/20)	34.440						
	Zuschuss BAFA-KWK		2.350							
	-	Instandsetzung & Modernisierung	Maßnahmen exkl. KWK/PV	204.788						
			KWK-Anlage	22.000						
PV-Anlage			34.440							
Kapitalanlagen	bis Endjahr	23.960	15.550							
	einjährig			16.167	14.796	12.102	9.626	7.266		
Jahresende	Einlagen <sup>144</sup>		26.300	26.900	27.300	27.900	28.500	29.000	29.500	
	+	Energief Lieferung & Förderung	Einspeisung KWK-Strom	158	164	171	177	184	192	200
			KWK-Zuschlag	753	753	753	753	753	753	753
			Vermarktung PV-Strom	1.427	1.427	1.427	1.427	1.427	1.427	1.427
	Verzinsung & Auflösung Kapitalanlagen		719	1.185	17.628	16.233	13.505	10.994	8.597	
	+	ESt-Gutschrift für Verlustausgleich	KWK-Anlage	138	144	143	137	138	137	130
			PV-Anlage	435	438	441	443	429	413	398
	+	Instandhaltung & Anlagenbetrieb <sup>145</sup>	KWK-Anlage	695	705	715	725	735	744	754
			PV-Anlage	422	428	435	441	448	454	461
			Sonstiges	190	193	196	199	202	205	208
	+	Energiebezug inkl. Grundgebühren	Gas	1.493	1.537	1.560	1.603	1.647	1.690	1.713
			KWK-Gas	2.727	2.839	2.895	2.950	3.061	3.172	3.228
			Strom	5.187	5.324	5.480	5.614	5.771	5.927	6.103
	-	Eigenversorgung/ Privatentnahmen	USt KWK-Wärme	771	787	796	801	812	824	829
			USt KWK-Strom	70	73	76	79	82	86	89
			USt PV-Strom <sup>146</sup>	106	106	106	106	106	106	106
			EEG-Umlage	83	100	117	121	124	128	132
	-	Zinsen Darlehen	KfW 152 (10/2/10)	1.300	1.300	1.300	1.143	985	825	663
			KWK-ErgKredit (10/2/10)	278	278	278	245	211	178	143
			KfW 274 (20/3/20)	878	878	878	878	836	793	749
	-	Tilgung Darlehen	KfW 152 (10/2/10)			15.689	15.846	16.005	16.165	16.326
			KWK-ErgKredit (10/2/10)			2.181	2.214	2.248	2.282	2.316
			KfW 274 (20/3/20)				1.644	1.686	1.729	1.773
-	ESt	KWK-Anlage								
		PV-Anlage								
KapErtrSt		180	296	365	359	351	342	333		
Bestand an liquiden Mitteln		15.550	16.167	14.796	12.102	9.626	7.266	5.079		

<sup>143</sup> Einzahlungen (+) und Auszahlungen (-) auf volle Euro gerundet. Zur Szenariodefinition siehe S. 165 ff.

<sup>144</sup> Jährlich aufzubringende Eigenmittel für die Instandhaltungsrücklage sowie für die laufenden Auszahlungen der Instandhaltung und des Anlagenbetriebs (inkl. Energiebezug, Grundgebühren, Versicherungen etc.), falls keine Modernisierungsmaßnahmen umgesetzt werden. Siehe hierzu auch S. 104.

<sup>145</sup> Auszahlungen für Instandhaltung (ggf. inkl. Instandsetzungen nach dem betrachteten Umsetzungszeitpunkt) und für den Anlagenbetrieb ohne Energiebezug und Grundgebühren von externen Lieferanten.

<sup>146</sup> Siehe hierzu die Festlegungen auf S. 180.

(Fortsetzung Tabelle 21)

2022	2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030	2031	2032	2033	2034
5.079	3.161	1.434	0	17.843	18.462	19.173	19.979	20.698	21.508	22.259	23.028	23.867
				17.843	18.462	19.173	19.979	20.698	21.508	22.259	23.028	
5.079	3.161	1.434										23.867
30.100	30.700	31.400	32.000	32.600	33.300	34.100	34.800	35.500	36.200	37.000	37.700	38.600
208	216	224	233	243	253	263	273	284	296	307	320	332
753	753	753										
1.427	1.427	1.427	1.427	1.427	1.427	1.427	1.427	1.427	1.427	1.427	1.427	1.427
6.371	4.413	2.650	1.185	1.721	2.274	2.850	3.449	4.070	4.715	5.383	6.074	233.117
123	121	120	192	193	194	194	195	187	187	192	183	187
382	365	348	331	313	294	275	256	236	216	194	173	151
764	774	784	793	803	813	823	838	852	867	882	896	911
468	475	482	489	497	504	512	520	527	535	543	551	560
211	214	217	220	223	227	230	234	238	241	245	249	252
1.756	1.800	1.844	1.888	1.932	1.975	2.041	2.084	2.128	2.173	2.238	2.282	2.348
3.284	3.395	3.506	3.562	3.673	3.785	3.896	4.007	4.063	4.174	4.341	4.397	4.564
6.258	6.432	6.609	6.804	6.979	7.173	7.367	7.581	7.776	7.990	8.223	8.438	8.670
833	844	856	593	609	625	642	659	669	686	711	720	745
93	96	100	104	108	113	117	122	127	132	137	143	148
106	106	106	106	106	106	106	106	106	106	106	106	106
136	140	144	148	153	157	162	167	172	177	182	188	194
500	335	168										
108	73	37										
704	658	610	561	511	460	408	354	298	242	183	124	63
16.490	16.655	16.821										
2.351	2.387	2.422										
1.818	1.864	1.912	1.961	2.011	2.062	2.114	2.168	2.223	2.280	2.338	2.398	2.459
323	313	304	296	430	569	712	862	1.017	1.179	1.346	1.518	1.697
3.161	1.434	0	17.843	18.462	19.173	19.979	20.698	21.508	22.259	23.028	23.867	251.097

**Tabelle 22:** Finanzplan [€] zum Basisszenario E\_MPEB<sup>147</sup>

		Jahr	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	
Jahresanfang	Bestand an liquiden Mitteln		100.000	13.672	14.228	14.550	1.230	1.453	1.581	
	+	Aufnahme Darlehen	KfW 151 EH 70 (20/3/10)	264.000						
			KfW 274 (20/3/20)	28.720						
	+	Zuschüsse	KfW-Tilgungszuschuss <sup>148</sup>	33.000						
			BAFA-Solarthermie	2.025						
	-	Instandsetzung & Modernisierung	Maßnahmen exkl. PV	266.025						
			PV-Anlage	28.720						
	-	Tilgung Darlehen KfW 151 EH 70 (20/3/10) <sup>148</sup>		33.000						
Kapitalanlagen			bis Endjahr	100.000	13.672	14.228	14.550	1.230	1.453	1.581
		einjährig								
Jahresende	Einlagen <sup>149</sup>		26.300	26.900	27.300	27.900	28.500	29.000	29.500	
	+	Vermarktung PV-Strom		1.267	1.267	1.267	1.267	1.267	1.267	1.267
		Verzinsung & Auflösung Kapitalanlagen		3.000	3.410	3.837	4.274	4.310	4.354	4.401
		ESt-Gutschrift für Verlustausgleich PV-Anlage		390	393	395	398	386	373	361
	-	Instandhaltung & Anlagenbetrieb <sup>150</sup>	PV-Anlage	406	412	418	425	431	438	444
			Sonstiges	754	765	777	788	800	812	825
	Strombezug inkl. Grundgebühren		12.205	12.530	12.902	13.227	13.598	13.969	14.389	
	-	Eigenversorgung/ Privatentnahmen	USt PV-Strom <sup>148</sup>	72	72	72	72	72	72	72
			EEG-Umlage	56	68	79	82	84	87	89
	-	Zinsen Darlehen	KfW 151 EH 70 (20/3/10)	2.310	2.310	2.310	2.310	2.185	2.058	1.930
			KfW 274 (20/3/20)	732	732	732	732	697	662	625
	-	Tilgung Darlehen	KfW 151 EH 70 (20/3/10)				12.534	12.659	12.785	12.913
			KfW 274 (20/3/20)				1.371	1.406	1.442	1.478
	KapErtrSt		750	853	959	1.068	1.078	1.088	1.100	
	Bestand an liquiden Mitteln		13.672	14.228	14.550	1.230	1.453	1.581	1.664	

**Tabelle 23:** Finanzplan [€] zur Unterlassungsalternative der Eigennutzerfallstudie<sup>147</sup>

		Jahr	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	
Jahresanfang	Bestand an liquiden Mitteln		100.000	8.286	8.516	8.673	8.911	9.121	9.235	
	-	Instandsetzung & Modernisierung								
		Kapitalanlagen	bis Endjahr	100.000	8.286	8.516	8.673	8.911	9.121	9.235
		einjährig								
Jahresende	Einlagen <sup>149</sup>		26.300	26.900	27.300	27.900	28.500	29.000	29.500	
	+	Verzinsung & Auflösung Kapitalanlagen		3.000	3.249	3.504	3.764	4.032	4.305	4.582
		Instandhaltung & Anlagenbetrieb <sup>150</sup>		269	273	277	281	284	288	292
	-	Energiebezug inkl. Grundgebühren	Gas	10.239	10.551	10.708	11.021	11.334	11.647	11.804
			Strom	9.756	9.997	10.270	10.510	10.785	11.059	11.365
	KapErtrSt		750	812	876	941	1.008	1.076	1.146	
	Bestand an liquiden Mitteln		8.286	8.516	8.673	8.911	9.121	9.235	9.475	

<sup>147</sup> Einzahlungen (+) und Auszahlungen (-) auf volle Euro gerundet. Zur Szenariodefinition siehe S. 165 ff.<sup>148</sup> Siehe hierzu die Festlegungen auf S. 180 und S. 184.<sup>149</sup> Jährlich aufzubringende Eigenmittel für die Instandhaltungsrücklage sowie für die laufenden Auszahlungen der Instandhaltung und des Anlagenbetriebs (inkl. Energiebezug, Grundgebühren, Versicherungen etc.), falls keine Modernisierungsmaßnahmen umgesetzt werden. Siehe hierzu auch S. 104.<sup>150</sup> Auszahlungen für Instandhaltung (ggf. inkl. Instandsetzungen nach dem betrachteten Umsetzungszeitpunkt) und für den Anlagenbetrieb ohne Energiebezug und Grundgebühren von externen Lieferanten.

(Fortsetzung Tabelle 22)

2022	2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030	2031	2032	2033	2034
1.664	1.895	2.085	2.439	1.593	877	346	101	0	92	241	446	601
1.664	1.895	2.023							92	241	446	
		62	2.439	1.593	877	346	101					601
30.100	30.700	31.400	32.000	32.600	33.300	34.100	34.800	35.500	36.200	37.000	37.700	38.600
1.267	1.267	1.267	1.267	1.267	1.267	1.267	1.267	1.267	1.267	1.267	1.267	1.267
4.451	4.508	4.632	7.064	6.200	5.467	4.923	4.672	4.569	4.572	4.579	4.592	158.287
348	334	321	306	292	277	262	246	230	213	196	178	160
451	458	464	471	478	486	493	500	508	515	523	531	539
836	848	861	874	887	900	914	928	942	956	971	985	1.000
14.760	15.178	15.596	16.061	16.479	16.943	17.408	17.919	18.384	18.894	19.451	19.963	20.520
72	72	72	72	72	72	72	72	72	72	72	72	72
92	95	98	101	104	107	110	113	116	120	124	127	131
1.801	1.671	1.539	7.029	6.471	5.884	5.268	4.621	3.941	3.228	2.479	1.693	867
587	548	509	468	426	384	340	295	249	202	153	103	52
13.043	13.173	13.305	11.177	11.736	12.323	12.939	13.586	14.266	14.979	15.728	16.514	17.340
1.516	1.554	1.594	1.635	1.677	1.719	1.763	1.808	1.854	1.902	1.950	2.000	2.051
1.113	1.127	1.143	1.156	1.152	1.147	1.144	1.143	1.142	1.143	1.145	1.148	1.153
1.895	2.085	2.439	1.593	877	346	101	0	92	241	446	601	154.589

(Fortsetzung Tabelle 23)

2022	2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030	2031	2032	2033	2034
9.475	16.326	26.104	0	9.538	9.727	9.987	10.196	10.432	10.707	10.955	11.119	11.375
				9.538	9.727	9.987	10.196	10.432	10.707	10.955	11.119	
6.674	16.326	26.104										11.375
30.100	30.700	31.400	32.000	32.600	33.300	34.100	34.800	35.500	36.200	37.000	37.700	38.600
11.481	21.335	31.345	4.666	4.952	5.244	5.544	5.850	6.163	6.484	6.813	7.146	257.067
297	301	36.438	310	315	319	325	330	335	340	346	351	356
12.116	12.430	12.742	13.055	13.367	13.680	14.150	14.462	14.776	15.088	15.558	15.870	16.340
11.640	11.948	12.255	12.596	12.905	13.247	13.587	13.964	14.304	14.680	15.087	15.463	15.871
1.202	1.252	1.310	1.167	1.238	1.311	1.386	1.462	1.541	1.621	1.703	1.787	1.872
16.326	26.104	0	9.538	9.727	9.987	10.196	10.432	10.707	10.955	11.119	11.375	261.228

**Tabelle 24:** Finanzplan [€] zum Basisszenario V\_FREI<sup>151</sup>

		Jahr	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	
Jahresanfang		Bestand an liquiden Mitteln	100.000	29.455	10.244	10.300	9.852	9.861	10.407	
	+	Aufnahme Darlehen KfW 152 (20/3/10)	18.925							
		Instandsetzung & Modernisierung	49.406							
-	Kapitalanlagen	bis Endjahr	69.519	29.455	10.244	10.300	9.852	9.861	10.407	
		einjährig	0	0	0	0	0	0	0	
Jahresende	+	Nettomieten	Bestandsmieten Vorjahr	56.364	66.521	60.978	67.910	62.254	69.301	63.530
			Mietpreisanpassung OVM	3.850	0	1.261	0	1.261	0	1.261
			Modernisierungsumlage	750						
			Neumieten im Jahr	4.631	0	4.726	0	4.822	0	4.917
	Umlagen auf Mieter <sup>152</sup>	Gas	1.873	1.929	1.957	2.014	2.070	2.126	2.154	
		Strom	8.201	8.420	8.670	8.889	9.139	9.389	9.671	
		Instandhaltung & Sonstiges	420	427	433	440	446	453	459	
		Verzinsung & Auflösung Kapitalanlagen	4.171	5.909	6.493	7.070	7.612	8.134	8.675	
		Aufnahme Darlehen einjährig	0	0	0	0	0	0	0	
		Gebäudeverwaltung	2.624	2.662	2.678	2.717	2.733	2.772	2.787	
		Umlageausfälle durch Leerstand	217	0	217	0	217	0	217	
		Instandhaltung & Anlagenbetrieb <sup>153</sup>	1.647	1.662	1.676	1.692	1.707	1.720	1.736	
	Energiebezug inkl. Grundgebühren	Gas	1.873	1.929	1.957	2.014	2.070	2.126	2.154	
		Strom	8.201	8.420	8.670	8.889	9.139	9.389	9.671	
	Zinsen Darlehen	KfW 152 (20/3/10)	189	189	189	189	179	169	158	
		einjährig	0	0	0	0	0	0	0	
	Tilgung Darlehen	KfW 152 (20/3/10)	0	0	0	1.027	1.037	1.047	1.058	
einjährig		0	0	0	0	0	0	0		
	Est	5.011	26.223	26.308	26.776	26.858	27.339	27.413		
	KapErtrSt	1.043	1.477	1.623	1.767	1.903	2.034	2.169		
	Entnahmen	30.000	30.400	30.900	31.400	31.900	32.400	32.900		
	Bestand an liquiden Mitteln	29.455	10.244	10.300	9.852	9.861	10.407	10.404		

<sup>151</sup> Einzahlungen (+) und Auszahlungen (-) auf volle Euro gerundet. Zur Szenariodefinition siehe S. 165 ff.

<sup>152</sup> Bei vollständiger Vermietung im Jahr, d. h. ohne Berücksichtigung von Umlageausfällen durch Leerstand.

<sup>153</sup> Auszahlungen für Instandhaltung (ggf. inkl. Instandsetzungen nach dem betrachteten Umsetzungszeitpunkt) und für den Anlagenbetrieb ohne Energiebezug und Grundgebühren von externen Lieferanten.

(Fortsetzung Tabelle 24)

2022	2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030	2031	2032	2033	2034
10.404	10.966	10.949	0	3.671	11.408	11.368	11.924	11.869	12.324	12.198	12.654	12.495
10.404	10.966	10.949	0	3.671	11.408	11.368	11.924	11.869	12.324	12.198	12.654	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	12.495
70.692	64.805	72.082	66.081	73.665	67.526	75.146	68.884	76.628	70.242	78.216	71.698	79.803
0	1.261	0	1.445	0	1.358	0	1.358	0	1.455	0	1.455	0
0	5.013	0	5.116	0	5.219	0	5.321	0	5.432	0	5.542	0
2.210	2.266	2.322	2.378	2.434	2.491	2.575	2.631	2.687	2.743	2.827	2.883	2.967
9.921	10.202	10.483	10.796	11.077	11.390	11.703	12.046	12.359	12.703	13.078	13.422	13.797
466	473	480	487	494	501	508	516	524	532	540	549	557
9.206	9.743	10.269	10.269	10.438	10.940	11.428	11.929	12.404	12.885	13.348	13.804	296.110
0	0	7.003	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2.828	2.842	2.884	2.907	2.948	2.965	3.005	3.022	3.065	3.085	3.129	3.149	3.192
0	217	0	233	0	233	0	233	0	233	0	233	0
1.751	1.768	33.716	1.801	1.817	1.833	1.850	1.867	1.886	1.904	1.921	1.939	1.958
2.210	2.266	2.322	2.378	2.434	2.491	2.575	2.631	2.687	2.743	2.827	2.883	2.967
9.921	10.202	10.483	10.796	11.077	11.390	11.703	12.046	12.359	12.703	13.078	13.422	13.797
148	137	126	576	530	482	432	379	323	264	203	139	71
0	0	0	427	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1.069	1.079	1.090	916	962	1.010	1.060	1.113	1.168	1.227	1.289	1.353	1.420
0	0	0	7.003	0	0	0	0	0	0	0	0	0
27.901	27.967	15.051	28.397	28.923	29.018	29.554	29.643	30.189	30.314	30.871	30.989	31.559
2.301	2.436	2.567	2.567	2.609	2.735	2.857	2.982	3.101	3.221	3.337	3.451	3.560
33.400	33.900	34.400	34.900	35.400	35.900	36.400	36.900	37.500	38.100	38.700	39.300	39.900
10.966	10.949	0	3.671	11.408	11.368	11.924	11.869	12.324	12.198	12.654	12.495	294.810

**Tabelle 25:** Finanzplan [€] zum Basisszenario V\_INST<sup>154</sup>

		Jahr	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021
Jahresanfang		Bestand an liquiden Mitteln	100.000	102.737	12.632	12.383	4.310	3.788	3.734
	+	Aufnahme Darlehen KfW 151 EH 100 (20/3/10)	163.337						
		KfW-Tilgungszuschuss <sup>155</sup>	8.167						
		Instandsetzung & Modernisierung	233.338						
Jahresende	-	Tilgung Darlehen KfW 151 EH 100 (20/3/10) <sup>155</sup>	8.167						
	Kapitalanlagen	bis Endjahr	29.999	102.737	12.632	12.383	4.310	3.788	3.734
		einjährig	0	0	0	0	0	0	0
	Nettomieten	Bestandsmieten Vorjahr	56.364	69.601	63.789	69.685	63.872	70.002	64.189
		Mietpreisanpassung OVM	1.848	0	117	0	234	0	1.128
		Modernisierungsumlage	5.727	0	0	0	0	0	0
		Neumieten im Jahr	5.191	0	5.298	0	5.405	0	5.512
	+ Umlagen auf Mieter <sup>156</sup>	Gas	1.306	1.347	1.367	1.407	1.447	1.487	1.507
		Strom	3.342	3.431	3.527	3.620	3.717	3.817	3.923
		Instandhaltung & Sonstiges	566	574	583	592	601	610	619
		Verzinsung & Auflösung Kapitalanlagen	1.800	7.861	8.581	9.275	9.512	9.713	9.907
		Gutschrift durch Est-Verlustausgleich	67.912	0	0	0	0	0	0
		Gebäudeverwaltung	2.766	2.783	2.769	2.788	2.781	2.801	2.833
		Umlageausfälle durch Leerstand	108	0	108	0	108	0	108
		Instandhaltung & Anlagenbetrieb <sup>157</sup>	1.795	1.812	1.829	1.846	1.864	1.882	1.899
	Energiebezug inkl. Grundgebühren	Gas	1.306	1.347	1.367	1.407	1.447	1.487	1.507
		Strom	3.342	3.431	3.527	3.620	3.717	3.817	3.923
-	Zinsen Darlehen KfW 151 EH 100 (20/3/10)	1.552	1.552	1.552	1.552	1.468	1.382	1.297	
	Tilgung Darlehen KfW 151 EH 100 (20/3/10)	0	0	0	8.419	8.503	8.588	8.674	
	Est	0	26.892	26.682	26.918	26.834	27.110	27.431	
	KapErtrSt	450	1.965	2.145	2.319	2.378	2.428	2.477	
	Entnahmen	30.000	30.400	30.900	31.400	31.900	32.400	32.900	
	Bestand an liquiden Mitteln	102.737	12.632	12.383	4.310	3.788	3.734	3.736	

<sup>154</sup> Einzahlungen (+) und Auszahlungen (-) auf volle Euro gerundet. Zur Szenariodefinition siehe S. 165 ff.

<sup>155</sup> Siehe hierzu die Festlegungen auf S. 184.

<sup>156</sup> Bei vollständiger Vermietung im Jahr, d. h. ohne Berücksichtigung von Umlageausfällen durch Leerstand.

<sup>157</sup> Auszahlungen für Instandhaltung (ggf. inkl. Instandsetzungen nach dem betrachteten Umsetzungszeitpunkt) und für den Anlagenbetrieb ohne Energiebezug und Grundgebühren von externen Lieferanten.

(Fortsetzung Tabelle 25)

2022	2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030	2031	2032	2033	2034
3.736	3.680	3.764	3.704	3.392	3.204	3.228	3.016	2.894	2.554	2.346	1.972	1.716
3.736	3.680	3.764	3.704	3.392	3.204	3.228	3.016	2.894	2.554	2.346	1.972	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1.716
71.331	65.421	72.836	66.809	74.866	68.644	76.578	70.196	78.088	71.580	79.706	73.063	81.323
0	1.285	0	1.802	0	1.552	0	1.384	0	1.483	0	1.483	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	5.619	0	5.734	0	5.850	0	5.965	0	6.089	0	6.212	0
1.547	1.588	1.628	1.668	1.708	1.748	1.809	1.849	1.889	1.929	1.990	2.030	2.090
4.027	4.137	4.249	4.368	4.484	4.607	4.732	4.863	4.992	5.127	5.271	5.413	5.561
628	638	647	657	667	677	687	697	708	718	729	740	751
10.097	10.278	10.458	10.633	10.789	10.930	11.068	11.195	11.311	11.410	11.500	11.571	220.421
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2.853	2.894	2.912	2.975	2.995	3.043	3.063	3.102	3.124	3.165	3.188	3.230	3.252
0	108	0	117	0	117	0	117	0	117	0	117	0
1.917	1.935	1.954	1.972	1.992	2.011	2.031	2.050	2.071	2.091	2.113	2.133	2.154
1.547	1.588	1.628	1.668	1.708	1.748	1.809	1.849	1.889	1.929	1.990	2.030	2.090
4.027	4.137	4.249	4.368	4.484	4.607	4.732	4.863	4.992	5.127	5.271	5.413	5.561
1.210	1.122	1.034	4.722	4.346	3.952	3.538	3.104	2.647	2.168	1.665	1.137	582
8.761	8.849	8.937	7.508	7.884	8.278	8.692	9.126	9.583	10.062	10.565	11.093	11.648
27.711	28.100	28.385	27.391	27.804	28.392	28.826	29.345	29.800	30.378	30.857	31.450	31.956
2.524	2.569	2.615	2.658	2.697	2.732	2.767	2.799	2.828	2.853	2.875	2.893	2.908
33.400	33.900	34.400	34.900	35.400	35.900	36.400	36.900	37.500	38.100	38.700	39.300	39.900
3.680	3.764	3.704	3.392	3.204	3.228	3.016	2.894	2.554	2.346	1.972	1.716	210.095

**Tabelle 26:** Finanzplan [€] zum Basisszenario V\_MPEB<sup>158</sup>

		Jahr	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	
Jahresanfang		Bestand an liquiden Mitteln	100.000	106.002	12.977	12.026	3.635	3.108	3.026	
	+	Aufnahme Darlehen KfW 151 EH 85 (20/3/10)	173.785							
		Zuschüsse	KfW-Tilgungszuschuss <sup>159</sup>	13.034						
			BAFA-Solarthermie	1.800						
		Instandsetzung & Modernisierung	250.835							
-		Tilgung Darlehen KfW 151 EH 85 (20/3/10) <sup>159</sup>	13.034							
	Kapitalanlagen	bis Endjahr	24.750	106.002	12.977	12.026	3.635	3.108	3.026	
		einjährig	0	0	0	0	0	0	0	
Jahresende	+	Nettomieten	Bestandsmieten Vorjahr	56.364	69.108	63.340	69.236	63.468	69.598	63.830
			Mietpreisanpassung OVM	1.848	0	117	0	234	0	1.091
			Modernisierungsumlage	5.233	0	0	0	0	0	0
			Neumieten im Jahr	5.191	0	5.298	0	5.405	0	5.512
	Umlagen auf Mieter <sup>160</sup>	Gas	0	0	0	0	0	0	0	
		Strom	5.223	5.362	5.520	5.659	5.817	5.976	6.154	
		Instandhaltung & Sonstiges	510	518	526	534	542	550	558	
		Verzinsung & Auflösung Kapitalanlagen	1.485	7.739	8.479	9.152	9.352	9.517	9.674	
		Gutschrift durch Est-Verlustausgleich	71.940	0	0	0	0	0	0	
		Gebäudeverwaltung	2.746	2.765	2.751	2.769	2.765	2.785	2.817	
		Umlageausfälle durch Leerstand	108	0	108	0	108	0	108	
		Instandhaltung & Anlagenbetrieb <sup>161</sup>	1.736	1.752	1.768	1.785	1.802	1.818	1.835	
	Energiebezug inkl. Grundgebühren	Gas	0	0	0	0	0	0	0	
		Strom	5.223	5.362	5.520	5.659	5.817	5.976	6.154	
		Zinsen Darlehen KfW 151 EH 85 (20/3/10)	1.608	1.608	1.608	1.608	1.520	1.432	1.343	
		Tilgung Darlehen KfW 151 EH 85 (20/3/10)	0	0	0	8.722	8.809	8.897	8.986	
		Est	0	25.928	26.479	26.715	26.651	26.928	27.253	
	KapErtrSt	371	1.935	2.120	2.288	2.338	2.379	2.419		
	Entnahmen	30.000	30.400	30.900	31.400	31.900	32.400	32.900		
	Bestand an liquiden Mitteln	106.002	12.977	12.026	3.635	3.108	3.026	3.004		

<sup>158</sup> Einzahlungen (+) und Auszahlungen (-) auf volle Euro gerundet. Zur Szenariodefinition siehe S. 165 ff.

<sup>159</sup> Siehe hierzu die Festlegungen auf S. 184.

<sup>160</sup> Bei vollständiger Vermietung im Jahr, d. h. ohne Berücksichtigung von Umlageausfällen durch Leerstand.

<sup>161</sup> Auszahlungen für Instandhaltung (ggf. inkl. Instandsetzungen nach dem betrachteten Umsetzungszeitpunkt) und für den Anlagenbetrieb ohne Energiebezug und Grundgebühren von externen Lieferanten.

(Fortsetzung Tabelle 26)

2022	2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030	2031	2032	2033	2034
3.004	2.918	3.000	2.912	2.603	2.382	2.509	2.269	2.117	1.745	1.507	1.102	1.914
3.004	2.918	3.000	2.912	2.603	2.382	2.509	2.269	2.117	1.745	1.507	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1.102	1.914
70.934	65.074	72.489	66.512	74.620	68.439	76.578	70.196	78.088	71.580	79.706	73.063	81.323
0	1.285	0	1.853	0	1.757	0	1.384	0	1.483	0	1.483	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	5.619	0	5.734	0	5.850	0	5.965	0	6.089	0	6.212	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
6.313	6.491	6.669	6.867	7.046	7.244	7.442	7.659	7.858	8.075	8.313	8.531	8.768
566	575	583	592	601	610	619	628	638	647	657	667	677
9.827	9.970	10.114	10.251	10.371	10.476	10.584	10.679	10.764	10.832	10.889	12.028	205.360
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2.837	2.879	2.899	2.963	2.984	3.042	3.063	3.101	3.125	3.166	3.188	3.229	3.253
0	108	0	117	0	117	0	117	0	117	0	117	0
1.852	1.869	1.886	1.904	1.922	1.941	1.959	1.977	1.997	2.016	2.036	2.056	2.076
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
6.313	6.491	6.669	6.867	7.046	7.244	7.442	7.659	7.858	8.075	8.313	8.531	8.768
1.253	1.163	1.071	4.892	4.503	4.094	3.666	3.215	2.743	2.246	1.725	1.178	603
9.076	9.167	9.259	7.778	8.167	8.576	9.004	9.455	9.927	10.424	10.945	11.492	12.067
27.534	27.944	28.230	27.222	27.641	28.334	28.774	29.300	29.762	30.347	30.834	31.435	31.949
2.457	2.493	2.529	2.563	2.593	2.619	2.646	2.670	2.691	2.708	2.722	2.732	2.739
33.400	33.900	34.400	34.900	35.400	35.900	36.400	36.900	37.500	38.100	38.700	39.300	39.900
2.918	3.000	2.912	2.603	2.382	2.509	2.269	2.117	1.745	1.507	1.102	1.914	194.773

**Tabelle 27:** Finanzplan [€] zur Unterlassungsalternative der Vermieterfallstudie<sup>162</sup>

		Jahr	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	
Jahresanfang	Bestand an liquiden Mitteln		100.000	8.274	9.161	8.838	9.645	9.313	10.135	
	-	Instandsetzung & Modernisierung	0							
		Kapitalanlagen	bis Endjahr	100.000	8.274	9.161	8.838	9.645	9.313	10.135
		einjährig	0	0	0	0	0	0	0	
Jahresende	+	Nettomieten	Bestandsmieten Vorjahr	56.364	63.504	58.213	64.814	59.413	66.125	60.614
			Mietpreisanpassung OVM	1.848	0	1.201	0	1.201	0	1.201
			Modernisierungsumlage	0	0	0	0	0	0	0
			Neumieten im Jahr	3.969	0	4.051	0	4.133	0	4.215
	Umlagen auf Mieter <sup>163</sup>	Gas	10.154	10.466	10.623	10.935	11.248	11.560	11.716	
		Strom	1.021	1.047	1.076	1.101	1.131	1.160	1.193	
		Instandhaltung & Sonstiges	130	132	134	136	138	140	142	
	Verzinsung & Auflösung Kapitalanlagen		6.000	6.488	7.010	7.505	8.036	8.529	9.056	
	Aufnahme Darlehen einjährig		0	0	0	0	0	0	0	
	Gebäudeverwaltung		2.487	2.540	2.539	2.593	2.590	2.645	2.641	
	Umlageausfälle durch Leerstand		325	0	325	0	325	0	325	
	Instandhaltung & Anlagenbetrieb <sup>164</sup>		1.268	1.277	1.286	1.295	1.304	1.313	1.322	
	Energiebezug inkl. Grundgebühren	Gas	10.154	10.466	10.623	10.935	11.248	11.560	11.716	
		Strom	1.021	1.047	1.076	1.101	1.131	1.160	1.193	
	- Zinsen Darlehen einjährig		0	0	0	0	0	0	0	
- Tilgung Darlehen einjährig		0	0	0	0	0	0	0		
Est		24.457	25.124	24.968	25.646	25.480	26.169	25.991		
KapErtrSt		1.500	1.622	1.753	1.876	2.009	2.132	2.264		
Entnahmen		30.000	30.400	30.900	31.400	31.900	32.400	32.900		
Bestand an liquiden Mitteln		8.274	9.161	8.838	9.645	9.313	10.135	9.785		

<sup>162</sup> Einzahlungen (+) und Auszahlungen (-) auf volle Euro gerundet. Zur Szenariodefinition siehe S. 165 ff.

<sup>163</sup> Bei vollständiger Vermietung im Jahr, d. h. ohne Berücksichtigung von Umlageausfällen durch Leerstand.

<sup>164</sup> Auszahlungen für Instandhaltung (ggf. inkl. Instandsetzungen nach dem betrachteten Umsetzungszeitpunkt) und für den Anlagenbetrieb ohne Energiebezug und Grundgebühren von externen Lieferanten.

(Fortsetzung Tabelle 27)

2022	2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030	2031	2032	2033	2034
9.785	10.625	10.255	0	0	10.879	10.486	11.353	10.942	11.715	11.228	12.011	11.487
9.785	10.625	10.174	0	0	10.879	10.486	11.353	10.942	11.715	11.228	12.011	0
0	0	81	0	0	0	0	0	0	0	0	0	11.487
67.435	61.816	68.746	63.017	70.157	64.310	71.568	65.604	72.979	66.898	74.491	68.284	76.003
0	1.201	0	1.294	0	1.294	0	1.294	0	1.386	0	1.386	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	4.297	0	4.385	0	4.473	0	4.561	0	4.656	0	4.750	0
12.029	12.341	12.653	12.966	13.278	13.591	14.059	14.372	14.684	14.997	15.465	15.778	16.246
1.222	1.255	1.288	1.324	1.357	1.393	1.430	1.470	1.506	1.546	1.590	1.630	1.674
144	146	148	150	152	154	156	159	162	164	167	170	172
9.555	10.076	10.648	10.564	10.564	11.043	11.494	11.971	12.408	12.865	13.292	13.724	290.179
0	0	9.771	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2.697	2.693	2.750	2.748	2.806	2.803	2.863	2.858	2.919	2.918	2.980	2.977	3.040
0	325	0	350	0	350	0	350	0	350	0	350	0
1.332	1.341	37.484	1.361	1.372	1.381	1.392	1.403	1.413	1.423	1.433	1.446	1.456
12.029	12.341	12.653	12.966	13.278	13.591	14.059	14.372	14.684	14.997	15.465	15.778	16.246
1.222	1.255	1.288	1.324	1.357	1.393	1.430	1.470	1.506	1.546	1.590	1.630	1.674
0	0	0	596	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	9.771	0	0	0	0	0	0	0	0	0
26.691	26.502	12.037	27.042	27.775	27.593	28.337	28.143	28.900	28.733	29.503	29.323	30.105
2.389	2.519	2.642	2.641	2.641	2.761	2.873	2.993	3.102	3.216	3.323	3.431	3.532
33.400	33.900	34.400	34.900	35.400	35.900	36.400	36.900	37.500	38.100	38.700	39.300	39.900
10.625	10.255	0	0	10.879	10.486	11.353	10.942	11.715	11.228	12.011	11.487	288.321



# Nomenklatur

Die folgende Auflistung definiert die Indizes und Indexmengen sowie die Parameter und Variablen, welche zur mathematischen Modellbeschreibung im Rahmen dieser Arbeit verwendet werden. Die Abkürzung AE steht stellvertretend für die verschiedenen spezifischen Maßeinheiten der Ausprägung von System(gestaltungs)optionen, die in Form einer Technologiekategorie abgebildet werden:

- für Energieumwandlungsanlagen die Leistungsabgabe [kW] oder die Kollektor- bzw. Modulfläche [m<sup>2</sup>],
- für thermische Speicher das Volumen [Liter] bzw. die Speichermasse [kg],
- für elektrische Speicher die Energiespeicherkapazität [kWh],
- für Flächen der Gebäudehülle der Wärmedurchgangskoeffizient [kWh/m<sup>2</sup>K].

## Indizes und Indexmengen (total streng geordnete Mengen)

$ac \in AC$	:= Merkmalskategorie eines Vergleichsmietpreisniveaus
$b \in B$	:= Gebäude
$BN_{b,n} \subseteq B \times N$	:= Zuordnung von Knoten $N$ zu den Gebäuden $B$
$BU_{b,u} \subseteq B \times U$	:= Zuordnung von Systemoptionen $U$ zu den Gebäuden $B$
$BZ_{b,z} \subseteq B \times Z$	:= Zuordnung von Zonen $Z$ zu den Gebäuden $B$
$cr \in CR$	:= Teilbereich des gesamten Änderungsausprägungsbereichs einer Systemoption
$d \in D$	:= Fremdfinanzierungsmöglichkeit (Darlehen und Investitionszuschüsse); alias $d'$ , $d''$
$D^a \subseteq D$	:= Annuitätendarlehen
$D^g \subseteq D$	:= reine Investitionszuschüsse
$D^r \subseteq D$	:= Tilgungsdarlehen (konstante Tilgungsrate)
$ec \in EC$	:= Energieträger bzw. -form
$i \in I$	:= Finanzplan(konto) eines Gebäude(teil)eigentümers/Investors

---

$I_{z,z} \subseteq I \times (Z^o \cup Z^t)$	:= Zuordnung von Gebäudenutzerzonen ( $Z^o \cup Z^t$ ) zu den Finanzplankonten $I$ der Gebäudeeigentümer
$n \in N$	:= Knoten des Energieflussgraphen; alias $n'$
$N^{clad} \subseteq N$	:= Gebäudehüllenknoten
$N^{est} \subseteq N$	:= Knoten mit Speichern für elektrische Energie
$N^{hst} \subseteq N$	:= Knoten mit Speichern für thermische Energie
$NP_{n,p} \subseteq N \times P$	:= Zuordnung von Prozessen $P$ zu den Knoten $N$
$NU_{n,u} \subseteq N \times U$	:= Zuordnung von Systemoptionen $U$ zu den Knoten $N$
$p \in P$	:= Prozess der Energiebereitstellung/-speicherung/-nachfrage
$p^{aux} \subseteq P$	:= Hilfsenergieprozesse
$p^{lp} \subseteq P$	:= Prozesse mit Energiebedarfsprofil zur Verteilung einer Jahresenergiemenge auf die Modellzeitscheiben
$ts \in TS$	:= Modellzeitscheibe, Zeitabschnitt eines repräsentativen (Typ-)Tages
$ty \in TY \subseteq Y$	:= Jahr mit möglicher Maßnahmenumsetzung (Umsetzungszeitpunkt), gleichzeitig Systemgestaltungsperiode (Zeitraum zwischen zwei Umsetzungszeitpunkten), die dem Umsetzungszeitpunkt am Periodenanfang zugeordnet ist; alias $ty'$ , $ty''$
$ty^1$	:= $\min(TY)$ , erster Umsetzungszeitpunkt im Analysezeitraum
$u \in U$	:= technische System(gestaltungs)option; alias $u'$
$UP_{u,p} \subseteq U \times P$	:= Zuordnung von Prozessen $P$ zu den Systemoptionen $U$
$y \in Y$	:= Modelljahr, entspricht einem Kalenderjahr; alias $y'$ , $y''$
$y^0$	:= $\min(Y)$ , Bestandsjahr (vor dem Beginn des Analysezeitraums)
$y^1$	:= $\min(Y) + 1$ , Startjahr (erstes Jahr des Analysezeitraums)
$y^e$	:= $\max(Y)$ , Endjahr/Analysehorizont (letztes Jahr des Analysezeitraums)
$YTY_{y,ty} \subseteq Y \times TY$	:= Zuordnung von Modelljahren $Y$ zu den Systemgestaltungsperioden $TY$
$z \in Z$	:= Gebäudezone, Teilbereich des Gebäudes
$Z^c \subseteq Z$	:= zentrale Gebäudezonen, gemeinschaftlich von mehreren Nutzerzonen ( $Z^o \cup Z^t$ ) genutzt
$Z^o \subseteq Z$	:= Gebäudenutzerzonen, durch den Eigentümer selbst genutzt
$Z^t \subseteq Z$	:= Gebäudenutzerzonen, durch den Eigentümer vermietet
$ZAC_{z,ac} \subseteq Z \times AC$	:= Zuordnung von Merkmalskategorien $AC$ der Vergleichsmietpreinsniveaus zu den Gebäudezonen $Z$

## Parameter

$ar_{u,ty}^c$	:= Bauteilfläche [m <sup>2</sup> ]
$ar_{z,y}^l$	:= Wohnfläche einer Zone [m <sup>2</sup> ]
$ar_{z,ty}^u$	:= Nutzfläche einer Zone [m <sup>2</sup> ]
$aux_{p,ty,ts}^{giv}$	:= vorgegebener Hilfsenergiebedarf einer Systemoption [kWh]
$aux_{p,ty,ts}^{misc}$	:= sonstiger entscheidungsunabhängiger Hilfsenergiebedarf [kWh]
$aux_{p,ty,ts}^{per}$	:= Hilfsenergieeinsatz bezogen auf den Energieoutput einer Anlage [%]
$aux_{p,ty,ts}^{pow}$	:= Hilfsenergie-Leistungsaufnahme einer Anlage [kW]
$avail_{u,ty,ts}$	:= zeitpunktabhängiger Verfügbarkeitsanteil der Zustandsausprägung einer Systemoption [%]
$big$	:= Hilfsparameter, Spezifikation/Definition erfolgt bei Verwendung in der Formeldarstellung
$cap_{u,ty}^0$	:= bestehende Zustandsausprägung einer Systemoption zum Beginn des Analysezeitraums [AE]
$cap_{p,ty}^{ref}$	:= Anteil am Prozessoutput, auf den die Kapazitätsangabe (Zustandsausprägung) einer Energieumwandlungsanlage bezogen wird oder Masseanteil eines Prozesses am Speichermedium eines Wärmespeichers [%]
$cf_{z,y}^{adm}$	:= Aufwendungsanteil der Mieteinzahlungen einer Gebäudenutzerzone für deren Verwaltung durch externe Dienstleister [%]
$crb_{u,cr,ty}^{lo}$	:= untere Schranke eines Ausprägungsänderungsbereichs einer Systemoption [AE]
$crb_{u,cr,ty}^{up}$	:= obere Schranke eines Ausprägungsänderungsbereichs einer Systemoption [AE]
$cst_{p,y}^{act}$	:= Instandhaltungs- und Betriebskosten einer Systemoption in Abhängigkeit ihres Einsatzes (Prozessaktivität) [€/kWh]
$cst_{u,y}^{cap}$	:= Instandhaltungs- und Betriebskosten einer Systemoption in Abhängigkeit ihrer Zustandsausprägung [€/AE]
$cst_{n,ec,y}^{exp}$	:= Preis einer Exportflussaktivität [€/kWh]
$cst_{u,y}^{fix}$	:= fixe Instandhaltungs- und Betriebskosten einer Systemoption [€]
$cst_{n,ec,y}^{imp}$	:= Preis einer Importflussaktivität [€/kWh]
$cst_{n,n',ec,y}^{int}$	:= Preis der Aktivität eines internen Flusses [€/kWh]
$ctr_{z,u}$	:= Nutzerzonenanteil an einer Systemoption [%]
$dbt_{d,ty}^g$	:= Investitionszuschuss in Abhängigkeit eines Darlehensbetrages [%]

---

$dbt_{d,ty}^{gp}$	:= tilgungsfreie Anfangszeit eines Darlehens [a]
$dbt_{d,ty}^{if1}$	:= Dauer der ersten Zinsbindungsperiode eines Darlehens [a]
$dbt_{d,ty}^{if2}$	:= Dauer der zweiten (und aller folgenden) Zinsbindungsperiode(n) eines Darlehens [a]
$dbt_{d,ty,y}^{in}$	:= Annuitätenfaktor zur Bestimmung der Ratenzahlung bei Annuitätendarlehen oder des Tilgungsbetrags bei Tilgungsdarlehen im Jahr $y$ für ein zum Umsetzungszeitpunkt $ty$ aufgenommenes Darlehen
$dbt_{d,ty}^{lt}$	:= (maximale) Laufzeit eines Darlehens [a]
$dis_{i,y}$	:= Verhältnisfaktor der jährlichen Entnahmen an liquiden Mitteln [%]
$dr_{y,y'}^{se}$	:= Dauer zwischen Jahresanfang von $y$ und Jahresende von $y'$ [a]
$dr_{y,y'}^{ss}$	:= Dauer zwischen Jahresanfang von $y$ und Jahresanfang von $y'$ [a]
$dr_{ts}^{tsa}$	:= aggregierte (Jahres-)Zeitscheibendauer, entspricht dem Gesamtzeitraum eines realen Jahres, den eine Zeitscheibe beim Ausrollen der Typwochen und Typtage repräsentiert [h]
$dr_{ts}^{tsd}$	:= einfache (Tages-)Zeitscheibendauer, entspricht dem durch eine Zeitscheibe repräsentierten Zeitraum eines realen Tages [h]
$eff_{p,ty}$	:= Wirkungsgrad oder (Jahres-)Nutzungsgrad eines Prozesses [%]
$eff_{p,ty,ts}^{sc}$	:= Ladewirkungsgrad eines Speichers [%]
$eff_{p,ty,ts}^{sd}$	:= Entladewirkungsgrad eines Speichers [%]
$equ_{i,y}^{in}$	:= jährliche Eigenmitteleinlage durch den Eigentümer [€]
$hlf_{u,ty}$	:= Bereitschaftswärmeaufwand eines Speichers [kWh/hK]
$if_{p,ec,ty}$	:= Anteil eines Energieträgers/einer Energieform am Gesamtenergieinput eines Prozesses [%]
$inv_{u,cr,ty}^{cap}$	:= variabler Anteil einer Anfangsauszahlung zur Maßnahmenumsetzung [€/AE]
$inv_{u,cr,ty}^{fix}$	:= fixer Anteil einer Anfangsauszahlung zur Maßnahmenumsetzung [€]
$ir_{d,ty,y}^{dl}$	:= Zinssatz im Jahr $y$ für ein zum Umsetzungszeitpunkt $ty$ aufgenommenes langfristiges Darlehen [%]
$ir_{i,y}^{ds}$	:= Zinssatz eines kurzfristigen Kredits [%]
$ir_{i,y}^{el}$	:= Zinssatz einer langfristigen Kapitalanlage [%]
$ir_{i,y}^{es}$	:= Zinssatz einer kurzfristigen Kapitalanlage [%]

$lp_{p,ty,ts}$	:= Anteil einer Jahresenergiemenge, der auf eine Modellzeitscheibe entfällt [%]
$lp_{p,ty,ts}^{clad}$	:= normierte Heizwärmebedarfsreduktion durch Dämmung einer einzelnen opaken Gebäudehüllfläche [kWh/(W/m <sup>2</sup> K)]
$lpad_{p,u,ty,ts}^{clad}$	:= normierter Korrekturwert zur Heizwärmebedarfsreduktion bei Kombination von Dämmmaßnahmen an mehreren opaken Gebäudehüllflächen [kWh/(W/m <sup>2</sup> K)]
$ltp_{u,ty}$	:= technische Standardnutzerdauer einer Systemoption [a]
$ltp_{u,ty}^0$	:= technische Restnutzungsdauer einer zum Beginn des Analysezeitraums bereits vorhandenen Zustandsausprägung einer Systemoption nach dem ersten Umsetzungszeitpunkt des Analysezeitraums [a]
$ltp_{u,ty}^u$	:= steuerrechtlicher AfA-Zeitraum einer Systemoption [a]
$ltp_{z,ty}^z$	:= steuerlicher AfA-Zeitraum/Restnutzungsdauer einer Zone [a]
$of_{p,ec,ty}$	:= Anteil eines Energieträgers/einer Energieform am Gesamtenergieoutput eines Prozesses [%]
$opr_{i,u}$	:= Betreiberanteil an einer Systemoption (KWK-/PV-Anlagen) [%]
$opr_{i,n,ec}^{exp}$	:= Betreiberanteil an einem Exportenergielieferfluss [%]
$opr_{i,n,n',ec}^{int}$	:= Betreiberanteil an einem internen Energielieferfluss [%]
$pe_{d,ty}^d$	:= Anforderung an den Primärenergiebedarf zur Bewilligung eines Investitionszuschusses oder geförderten Darlehens [kWh/m <sup>2</sup> a]
$pef_{n,ec,y}^{imp}$	:= Primärenergiefaktor für einen Importfluss
$pef_{n,n',ec,y}^{int}$	:= Primärenergiefaktor für einen internen Fluss
$res_{u,ty}$	:= Faktor zur Beeinflussung des anzusetzenden Restwert einer Systemoption am Ende des Analysezeitraums [%]
$rf_{z,y}$	:= Faktor zur Über-/Unterschreitung des ortsüblichen Vergleichsmietpreises für den Gebäudeausgangszustand [%]
$rf_{ac,y}^{ac}$	:= Anpassungsfaktor der Über-/Unterschreitung des ortsüblichen Vergleichsmietpreises nach einer Modernisierung [%]
$rnt_{z,y}$	:= monatlicher ortsüblicher Vergleichsmietpreis für den Gebäudeausgangszustand [€/m <sup>2</sup> ]
$rnt_{ac,y}^{ac}$	:= Erhöhung des monatlichen ortsüblichen Vergleichsmietpreises nach einer Modernisierung [%]
$seg_{u,ty}$	:= Modulgröße einer Systemoption (Schrittweite der Änderungsausprägung) [AE]
$shc_{u,ty}$	:= spezifische Wärmekapazität eines Speichermediums [kWh/kgK]

$tax_{i,y}^{cg}$	:= Kapitalertragssteuersatz [%]
$tax_{i,y}^{inc}$	:= Einkommensteuersatz [%]
$ten_{z,y',y}$	:= Anzahl der bestehenden Mietverhältnisse im Jahr $y$ , die im Jahr $y'$ begonnen haben
$tmp_{n,ty,ts}^n$	:= mittlere Knotentemperatur innerhalb einer Typwoche [°C]
$tmp_{u,ty}^{smax}$	:= maximale Innentemperatur eines Wärmespeichers [°C]
$tmp_{p,ty,ts}^{smin}$	:= minimale Ausspeichertemperatur eines Wärmespeichers [°C]
$vf_{z,y}$	:= Faktor zur Berücksichtigung entgangener Mieteinnahmen durch Leerstand zwischen Mieterwechseln für den Gebäudeausgangszustand [%]
$vf_{ac,y}^{ac}$	:= Anpassungsfaktor für die Leerstandzeiten zwischen Mieterwechseln nach einer Modernisierung [%]
$wf_i$	:= Wichtungsfaktor für den Entscheidungseinfluss eines Eigentümers innerhalb einer Eigentümergemeinschaft

## Variablen

$ACAM \in \mathbb{R}$	:= Zielfunktionswert: Gewichteter Vermögensendwert aller Gebäude(teil)eigentümer im Analysehorizont [€]
$bCAP_{u,ty} \in \{0,1\}$	:= Binärvariable zur Zustandsausprägung einer Systemoption
$bCAP_{u,ty}^{dis} \in \{0,1\}$	:= Binärvariable zur Änderungsausprägung (Rückbau) einer Systemoption
$bCAP_{u,cr,ty}^{ext} \in \{0,1\}$	:= Binärvariable zur Änderungsausprägung (Zubau) einer Systemoption
$bDBT_{b,d,ty}^{rm} \in \{0,1\}$	:= Binärvariable zur Inanspruchnahme eines Darlehens
$bRNT_{ac,y}^{comp} \in \{0,1\}$	:= Binärvariable zur Erfüllung einer Merkmalskategorie für ein ortsübliches Vergleichsmietpreisniveau
$bRNT_{z,y,y}^{incr1} \in \{0,1\}$	:= Binärvariable zur Mietpreisanpassung an ein ortsübliches Vergleichsmietpreisniveau
$bSD_{p,ty,ts} \in \{0,1\}$	:= Binärvariable zur Entladung eines Speicherprozesses
$bUA_{u,ty,ts} \in \{0,1\}$	:= Binärvariable zum zeitlichen Einsatz einer Systemoption
$bUPG_{z,ty} \in \{0,1\}$	:= Binärvariable zur Auslösung eines Standardsprungs
$CAP_{u,ty} \in \mathbb{R}_+$	:= Zustandsausprägung einer Systemoption [AE]
$CAP_{u,ty}^{dis} \in \mathbb{R}_+$	:= Änderungsausprägung (Rückbau) einer Systemoption [AE]

$CAP_{u,cr,ty}^{ext} \in \{0, crb_{u,cr,ty}^{lo} \dots crb_{u,cr,ty}^{up}\}$	:= Änderungsausprägung (Zubau) einer Systemoption [AE]
$CST_{i,y}^{opr} \in \mathbb{R}_+$	:= jährliche Instandhaltungs- und Betriebsauszahlungen des Betreibers einer stromerzeugenden Anlage [€]
$CST_{z,y}^{vt} \in \mathbb{R}_+$	:= Leerstandkosten einer Gebäudenutzerzone [€]
$CST_{z,y}^z \in \mathbb{R}_+$	:= jährliche Instandhaltungs- und Betriebsauszahlungen einer Gebäudenutzerzone [€]
$CST_{z,y}^{zna} \in \mathbb{R}_+$	:= nicht umlagefähige jährliche Instandhaltungs- und Betriebsauszahlungen für eine Gebäudenutzerzone [€]
$DBT_{i,u,d,ty,y}^{gr} \in \mathbb{R}_+$	:= Tilgungszuschuss am Ende des Jahres $y$ für ein zum Umsetzungszeitpunkt $ty$ in Anspruch genommenes Darlehen [€]
$DBT_{i,u,d,ty,y}^{in} \in \mathbb{R}_+$	:= Ratenzahlung (Tilgung und Zinsen) im Jahr $y$ für ein zum Umsetzungszeitpunkt $ty$ aufgenommenes Darlehen [€]
$DBT_{i,u,d,ty,y}^{rm} \in \mathbb{R}_+$	:= Restschuld eines zum Umsetzungszeitpunkt $ty$ aufgenommenen Darlehens zum Beginn des Jahres $y$ [€]
$DBT_{i,y}^s \in \mathbb{R}_+$	:= Aufnahmebetrag eines kurzfristigen Kredites am Ende des Jahres $y$ [€]
$DBT_{i,u,d,ty,y}^{srp} \in \mathbb{R}_+$	:= Sondertilgung am Ende des Jahres $y$ für ein zum Umsetzungszeitpunkt $ty$ in Anspruch genommenes Darlehen [€]
$dDBT_{i,u,d,ty,y}^{in} \in \mathbb{R}_+$	:= Hilfsvariable zur Ratenzahlung für ein zum Umsetzungszeitpunkt $ty$ in Anspruch genommenes Darlehen [€]
$DIAM \in \mathbb{R}$	:= Zielfunktionswert: jährliche Entnahme liquider Mittel [€]
$dPA_{p,ty,ts}^a \in \mathbb{R}_+$	:= Hilfsvariable zur Aktivität eines Prozesses [kWh]
$dPA_{p,ty,ts}^b \in \mathbb{R}_+$	:= Hilfsvariable zur Aktivität eines Prozesses [kWh]
$DPR_{u,i,ty,y}^{opr} \in \mathbb{R}_+$	:= einem Betreiber zurechenbarer steuerlicher AfA-Anteil im Jahr $y$ einer zum Zeitpunkt $ty$ installierten Stromerzeugungsanlage [€]
$DPR_{u,z,ty,y}^z \in \mathbb{R}_+$	:= einer Gebäudenutzerzone zurechenbarer steuerlicher AfA-Anteil im Jahr $y$ einer zum Zeitpunkt $ty$ installierten Systemoption [€]
$EQU_{i,y}^{dis} \in \mathbb{R}_+$	:= Entnahme liquider Mittel am Ende des Jahres $y$ [€]
$EQU_{i,y}^l \in \mathbb{R}_+$	:= Einsatz liquider Mittel vom Ende des Vorjahres für eine langfristige Kapitalanlage am Anfang des Jahres $y$ [€]
$EQU_{i,u,ty}^m \in \mathbb{R}_+$	:= Einsatz liquider Mittel vom Ende des Vorjahres zur Maßnahmenfinanzierung zum Umsetzungszeitpunkt $ty$ [€]
$EQU_{i,y}^s \in \mathbb{R}_+$	:= liquide Mittel am Ende des Jahres $y$ [€]

$FA_{n,ec,ty,ts}^{exp} \in \mathbb{R}_+$	:= unterjährige Exportflussaktivität, Energiebedarf der Energieanwendungen oder Energieeinspeisung ins Netz [kWh]
$FA_{n,ec,ty,ts}^{imp} \in \mathbb{R}_+$	:= unterjährige Importflussaktivität, Energiebereitstellung an der Gebäudegrenze bzw. am Hausanschluss [kWh]
$FA_{n,n',ec,ty,ts}^{int} \in \mathbb{R}_+$	:= unterjährige Aktivität eines internen Energieflusses [kWh]
$FA_{n,ec,ty}^{yexp} \in \mathbb{R}_+$	:= jährliche Exportflussaktivität, Energiebedarf der Energieanwendungen oder Energieeinspeisung ins Netz [kWh]
$FA_{n,ec,ty}^{yimp} \in \mathbb{R}_+$	:= jährliche Importflussaktivität, Energiebereitstellung an der Gebäudegrenze bzw. am Hausanschluss [kWh]
$FA_{n,n',ec,ty}^{yint} \in \mathbb{R}_+$	:= jährliche Aktivität eines internen Energieflusses [kWh]
$FR_{z,y',y} \in \mathbb{R}_+$	:= zu berücksichtigender Förderbetrag bei der Mietpreissteigerung [€/m <sup>2</sup> ]
$INC_{i,y}^{opr} \in \mathbb{R}_+$	:= Einzahlungen aus der Bewirtschaftung stromerzeugender Anlagen [€]
$INC_{z,y}^{rnt} \in \mathbb{R}_+$	:= Mieten/Einzahlungen aus der Gebäudebewirtschaftung [€]
$INV_{u,ty} \in \mathbb{R}_+$	:= Anfangsauszahlung zur Maßnahmenumsetzung [€]
$PA_{p,ty,ts} \in \mathbb{R}_+$	:= unterjährige Aktivität/Energieoutput eines Prozesses [kWh]
$PA_{p,ty}^y \in \mathbb{R}_+$	:= jährliche Aktivität/Energieoutput eines Prozesses [kWh]
$PE_{b,ty} \in \mathbb{R}_+$	:= Primärenergiebedarf eines Gebäudes [kWh/m <sup>2</sup> a]
$PEAM \in \mathbb{R}$	:= Zielfunktionswert: Mittlerer Jahresprimärenergiebedarf im Analysezeitraum [kWh/m <sup>2</sup> a]
$RNT_{z,y',y} \in \mathbb{R}_+$	:= monatlicher Mietpreis im Jahr $y$ für ein Mietverhältnis, das im Jahr $y'$ begonnen hat [€/m <sup>2</sup> ]
$RES_{y,ty,y} \in \mathbb{R}_+$	:= Restwert einer zum Zeitpunkt $ty$ installierten Systemoption im Jahr $y$ (linearer Wertverlust) [€]
$RNT_{z,y',y}^{incr1} \in \mathbb{R}_+$	:= Mietpreiserhöhung (§ 558 BGB nach Modernisierung) für ein Mietverhältnis, das im Jahr $y'$ begonnen hat [€/m <sup>2</sup> ]
$RNT_{z,y',ty}^{incr2} \in \mathbb{R}_+$	:= Mietpreiserhöhung (§ 558 BGB vor Modernisierung) für ein im Jahr $y'$ begonnenes Mietverhältnis [€/m <sup>2</sup> ]
$RNT_{z,ty}^{mod} \in \mathbb{R}_+$	:= Mietpreiserhöhung (§ 559 BGB) [€/m <sup>2</sup> ]
$SC_{p,ec,ty,ts} \in \mathbb{R}_+$	:= Energieaufnahme eines Speicherprozesses [kWh]
$SD_{p,ec,ty,ts} \in \mathbb{R}_+$	:= Energieabgabe eines Speicherprozesses [kWh]
$SL_{p,ty,ts} \in \mathbb{R}_+$	:= gespeicherte Energie in einem Speicherprozess [kWh]

# Literaturverzeichnis

- [1] 50HERTZ TRANSMISSION GMBH ET AL.: *Marktwert-/Referenzmarktwertübersicht*; [URL: <http://www.netztransparenz.de/de/Referenzmarktwerte.htm>], abgerufen am 30. Okt. 2014.
- [2] 50HERTZ TRANSMISSION GMBH ET AL.: *Netztransparenz*; [URL: <http://www.netztransparenz.de/de/index.htm>], abgerufen am 29. Okt. 2014.
- [3] ADAM, D.: *Planung und Entscheidung. Modelle - Ziele - Methoden*; Gabler, Wiesbaden 1996.
- [4] AGEB - AG ENERGIEBILANZEN E. V. (HRSG.): *Anwendungsbilanzen für die Endenergiesektoren in Deutschland in den Jahren 2011 und 2012 mit Zeitreihen von 2008 bis 2012*; Berlin 2013.
- [5] AGEB - AG ENERGIEBILANZEN E. V. (HRSG.): *Auswertungstabellen zur Energiebilanz Deutschland 1990 bis 2013*; Berlin 2014.
- [6] AGNEW, M. ET AL.: *A model for energy supply systems alternatives and their general environmental impact*; International Institute for Applied Systems Analysis, Laxenburg, Austria 1979.
- [7] ALBACH, H.: *Investition und Liquidität. Die Planung des optimalen Investitionsbudgets*; Gabler, Wiesbaden 1962.
- [8] ALBRECHT, T. ET AL.: *Zum Sanieren motivieren. Eigenheimbesitzer zielgerichtet für eine energetische Sanierung gewinnen*; Projektverbund ENEF-Haus (Hrsg.), Berlin 2010.
- [9] AL-HOMOUD, M. S.: *Optimum thermal design of office buildings*; in: International Journal of Energy Research; Jg. 21 (1997), S. 941–57.
- [10] ALMEIDA, R. M. S. F. / DE FREITAS, V. P.: *Multi-objective optimization for school buildings retrofit combining artificial neural networks and life cycle cost*; in: Mahdavi, A. / Martens, B. (Hrsg.): *Contributions to building physics (Proceedings 2<sup>nd</sup> CESBP)*; Vienna University of Technology, Vienna 2013, S. 943–50.

- [11] ARLT, J. / PFEIFFER, M.: *Lebensdauer der Baustoffe und Bauteile zur Harmonisierung der wirtschaftlichen Nutzungsdauer im Wohnungsbau*; Fraunhofer-IRB-Verlag, Stuttgart 2005.
- [12] ASADI, E. ET AL.: *Multi-objective optimization for building retrofit strategies: A model and an application*; in: *Energy and Buildings*; Jg. 44 (2012), S. 81–87.
- [13] ASUE - ARBEITSGEMEINSCHAFT FÜR SPARSAMEN UND UMWELTFREUNDLICHERGIEVERBRAUCH E. V. (HRSG.): *BHKW-Kenndaten 2014/2015*; Berlin 2014.
- [14] ASUE - ARBEITSGEMEINSCHAFT FÜR SPARSAMEN UND UMWELTFREUNDLICHEN ENERGIEVERBRAUCH E. V. (HRSG.): *(R)Evolution im Wärmemarkt. Kraft-Wärme-Kopplung: Das Multitalent der Energiewende*; Berlin 2012.
- [15] BAFA - BUNDESAMT FÜR WIRTSCHAFT UND AUSFUHRKONTROLLE: *Energie*; [URL: <http://www.bafa.de/bafa/de/energie/index.html>], abgerufen am 31. Okt. 2014.
- [16] BAFA - BUNDESAMT FÜR WIRTSCHAFT UND AUSFUHRKONTROLLE: *Heizen mit Erneuerbaren Energien*; [URL: [http://www.bafa.de/bafa/de/energie/erneuerbare\\_energien/](http://www.bafa.de/bafa/de/energie/erneuerbare_energien/)], abgerufen am 17. Nov. 2014.
- [17] BAFA - BUNDESAMT FÜR WIRTSCHAFT UND AUSFUHRKONTROLLE: *Fördermittel*; [URL: <http://www.bafa.de/bafa/de/index.html>], abgerufen am 29. Okt. 2014.
- [18] BAFA - BUNDESAMT FÜR WIRTSCHAFT UND AUSFUHRKONTROLLE (HRSG.): *Merkblatt Fernwärmeverdrängung*; Eschborn 2013.
- [19] BAFA - BUNDESAMT FÜR WIRTSCHAFT UND AUSFUHRKONTROLLE (HRSG.): *Erneuerbare Energien. Wärmepumpen mit Prüfcertifikat des COP-Wertes*; Eschborn 2014.
- [20] BAMBERG, G. ET AL.: *Betriebswirtschaftliche Entscheidungslehre*; Vahlen, München 2012.
- [21] BAMBROOK, S. M. ET AL.: *Design optimisation for a low energy home in Sydney*; in: *Energy and Buildings*; Jg. 43 (2011), S. 1702–11.
- [22] BANDARA, R. M. P. S. / ATTALAGE, R. A.: *Optimization methodologies for building performance modelling and optimization*; National Engineering Conference 2012, 18<sup>th</sup> ERU Symposium, University of Moratuwa, Sri Lanka 2012. [URL: <http://www.eru.mrt.ac.lk/files/eru2012/eru201206.pdf>], abgerufen am 03. Juni 2014.
- [23] BANDOW, G. / HOLZMÜLLER, H. H. (Hrsg.): *„Das ist gar kein Modell!“. Unterschiedliche Modelle und Modellierungen in Betriebswirtschaftslehre und Ingenieurwissenschaften*; Gabler, Wiesbaden 2010.

- [24] BAYERISCHES LANDESAMT FÜR STATISTIK: *Zensusdatenbank Zensus 2011 der Statistischen Ämter des Bundes und der Länder*; [URL: <https://ergebnisse.zensus2011.de/>], abgerufen am 10. Nov. 2014.
- [25] BAYERISCHES LANDESAMT FÜR STEUERN (HRSG.): *Hilfe zu Photovoltaikanlagen*; Nürnberg 2015.
- [26] BEALE, E. M. L.: *On minimizing a convex function subject to linear inequalities*; in: *Journal of the Royal Statistical Society*; Jg. 17 (1955), S. 173–84.
- [27] BELLINGER, B.: *Langfristige Finanzierung*; Gabler, Wiesbaden 1964.
- [28] BERLINER MIETERVEREIN E. V.: *Blockheizkraftwerke. Sparbüchsen für Mieter und Vermieter*; MieterMagazin 2010. [URL: <http://www.berliner-mieterverein.de/magazin/online/mm0310/031024.htm>], abgerufen am 30. Juli 2012.
- [29] BETTGENHÄUSER, K. ET AL.: *Klimaschutz durch Reduzierung des Energiebedarfs für Gebäudekühlung*; Umweltbundesamt (Hrsg.), Dessau-Roßlau 2011.
- [30] BHKW-INFOTHEK: *Hersteller von Batteriespeichern entdecken KWK-Anlagen*; 2014. [URL: <http://www.bhkw-infothek.de/nachrichten/20769/2014-04-29-hersteller-von-batteriespeichern-entdecken-kwk-anlagen>], abgerufen am 18. Nov. 2014.
- [31] BIALLO & TEAM GMBH: *Das Verbraucherportal für private Finanzen*; [URL: <http://www.biallo.de/>], abgerufen am 31. Okt. 2014.
- [32] BIALLO & TEAM GMBH: *Die besten offenen Immobilienfonds Europas im 5-Jahres-Vergleich*; [URL: <http://www.biallo.de/immobilienfonds/europa/>], abgerufen am 01. Nov. 2014.
- [33] BICHIOU, Y. / KRARTI, M.: *Optimization of envelope and HVAC systems selection for residential buildings*; in: *Energy and Buildings*; Jg. 43 (2011), S. 3373–82.
- [34] BIETHAHN, J.: *Optimierung und Simulation*; Oldenbourg, München 2004.
- [35] BKI - BAUKOSTENINFORMATIONSZENTRUM DEUTSCHER ARCHITEKTENKAMMERN GMBH (Hrsg.): *Objektdaten G3. Technische Gebäudeausrüstung. Kosten abgerechneter Bauwerke*; Stuttgart 2012.
- [36] BKI - BAUKOSTENINFORMATIONSZENTRUM DEUTSCHER ARCHITEKTENKAMMERN GMBH (Hrsg.): *Baukosten, Positionen 2014. Statistische Kostenkennwerte*; Stuttgart 2014.
- [37] BLANK, H. / BÖRSTINGHAUS, U. P.: *Miete. Das gesamte BGB-Mietrecht. Kommentar*; Beck, München 2014.

- [38] BLANK, H. / SCHMIDT-FUTTERER, W.: *Mietrecht. Großkommentar des Wohn- und Gewerberaummietrechts*; Beck, München 2013.
- [39] BLOHM, H. ET AL.: *Investition. Schwachstellenanalyse des Investitionsbereichs und Investitionsrechnung*; Vahlen, München 2013.
- [40] BLUMENTRATH, U.: *Investitions- und Finanzplanung mit dem Ziel der Endwertmaximierung*; Gabler, Wiesbaden 1969.
- [41] BMF - BUNDESMINISTERIUM DER FINANZEN: *AfA-Tabelle für die allgemein verwendbaren Anlagegüter („AV“)*, BStBl I 2000, S. 1532; Berlin 2000.
- [42] BMWi - BUNDESMINISTERIUM FÜR WIRTSCHAFT UND ENERGIE (HRSG.): *Sanierungsbedarf im Gebäudebestand*; Berlin 2014.
- [43] BMWi - BUNDESMINISTERIUM FÜR WIRTSCHAFT UND ENERGIE (HRSG.): *Marktanalyse Photovoltaik-Dachanlagen*; Berlin 2015.
- [44] BMWi - BUNDESMINISTERIUM FÜR WIRTSCHAFT UND TECHNOLOGIE / BMU - BUNDESMINISTERIUM FÜR UMWELT NATURSCHUTZ UND REAKTORSICHERHEIT (HRSG.): *Energiekonzept für eine umweltschonende, zuverlässige und bezahlbare Energieversorgung*; Berlin 2010.
- [45] BORN, R. ET AL.: *Energieeinsparung durch Verbesserung des Wärmeschutzes und Modernisierung der Heizungsanlage für 31 Musterhäuser der Gebäudetypologie*; Institut Wohnen und Umwelt GmbH (Hrsg.), Darmstadt 2003.
- [46] BOUCLAGHEM, N.: *Optimising the design of building envelopes for thermal performance*; in: *Automation in Construction*; Jg. 10 (2000), S. 101–12.
- [47] BOZA-KISS, B. ET AL.: *Handbook of sustainable building policies. Composing building blocks*; United Nations Environment Programme (Hrsg.), Paris 2013.
- [48] BROOKE, A. ET AL.: *GAMS, a user's guide*; GAMS Development Corporation (Hrsg.), Washington D. C. 1998.
- [49] BSW - BUNDESVERBAND SOLARWIRTSCHAFT E. V. / MESSE INTERSOLAR EUROPE: *Preisrutsch bei Solarstromspeichern*; Pressemitteilung, Berlin 2014.
- [50] BUNDESRAT: *Gesetz zur steuerlichen Förderung von energetischen Sanierungsmaßnahmen an Wohngebäuden - Zustimmungsversagung*, Drucksache 17/6584; Berlin 2011.
- [51] BUNDESRAT: *Vermittlung zur Gebäudesanierung beendet*; 2012. [URL: <http://www.bundesrat.de/SharedDocs/pm/2012/194-2012.html>], abgerufen am 01. Juli 2014.

- [52] BUNDESREGIERUNG: *Entwurf eines Gesetzes zur steuerlichen Förderung von energetischen Sanierungsmaßnahmen an Wohngebäuden*, Drucksache 17/6251; Berlin 2011.
- [53] BUNDESREGIERUNG: *Der Weg zur Energie der Zukunft - sicher, bezahlbar und umweltfreundlich. Eckpunktepapier der Bundesregierung zur Energiewende*; Berlin 2011.
- [54] BUNDESREGIERUNG: *Erfahrungsbericht zum Erneuerbare-Energien-Wärme-gesetz*, Drucksache 17/11957; Berlin 2012.
- [55] BUNDESREGIERUNG: *Entwurf eines Gesetzes zur Dämpfung des Mietanstiegs auf angespannten Wohnungsmärkten und zur Stärkung des Bestellerprinzips bei der Wohnungsvermittlung (Mietrechtsnovellierungsgesetz – MietNovG)*, Drucksache 18/3121; 2014.
- [56] BÜRGER, V.: *Energieeinsparquote und Weiße Zertifikate: Ein marktorientierter Ansatz zur Steigerung der Stromeffizienz in Haushalten*; in: Fischer, C. (Hrsg.): *Strom sparen im Haushalt. Trends, Einsparpotenziale und neue Instrumente für eine nachhaltige Energiewirtschaft*; oekom-Verlag, München 2008, S. 90–105.
- [57] BÜRGER, V. ET AL.: *Energieeinsparquote für Deutschland? Bewertung des Instruments der Energieeinsparquote (Weiße Zertifikate) auf seine Eignung als Klimaschutzinstrument für Deutschland*; Öko-Institut e. V. und Fraunhofer ISI (Hrsg.), Freiburg 2012.
- [58] BÜRGER, V. / WIEGMANN, K.: *Energieeinsparquote und Weiße Zertifikate. Potenziale und Grenzen einer Quotenregelung als marktorientiertes und budget-unabhängiges Lenkungsinstrument zur verstärkten Durchdringung von nachfrageseitigen Energieeinsparmaßnahmen*; Öko-Institut e. V. (Hrsg.), Freiburg 2007.
- [59] BUR, H.: *Erhaltungsaufwand*; 2014. [URL: <https://products.haufe.de/#link?productid=PI11444&docid=HI6445952>], abgerufen am 01. Juli 2014.
- [60] CALDAS, L. G. / NORFORD, L. K.: *Genetic algorithms for optimization of building envelopes and the design and control of HVAC systems*; in: *Journal of Solar Energy Engineering*; Jg. 125 (2003), S. 343.
- [61] CHARNES, A. / COOPER, W. W.: *Chance-Constrained programming*; in: *Management Science*; Jg. 6 (1959), S. 73–79.
- [62] CHARNES, A. ET AL.: *Application of linear programming to financial budgeting and the costing of funds*; in: *The Journal of Business*; Jg. 32 (1959), S. 20–46.

- [63] CHRISTENSEN, C. ET AL.: *BEopt: software for identifying optimal building designs on the path to zero net energy*; ISES 2005 Solar World Congress, Orlando, Florida 06. Aug. 2005. [URL: <http://www.nrel.gov/buildings/pdfs/37733.pdf>], abgerufen am 03. Juni 2014.
- [64] CLAUSNITZER, K.-D. ET AL.: *Allgemeinstrom in Wohngebäuden. Dämpfung der Wohn-Nebenkosten durch Innovationen zur Reduktion des Allgemeinstromverbrauchs*; Bremer Energie Institut (Hrsg.), Bremen 2009.
- [65] COLEY, D. A. / SCHUKAT, S.: *Low-energy design: combining computer-based optimisation and human judgement*; in: *Building and Environment*; Jg. 37 (2002), S. 1241–47.
- [66] COOK, W. ET AL.: *Sensitivity theorems in integer linear programming*; in: *Mathematical Programming*; Jg. 34 (1986), S. 251–64.
- [67] CRAWLEY, D. B. ET AL.: *EnergyPlus, a new-generation building energy simulation program*; Renewable and Advanced Energy Systems for the 21<sup>st</sup> Century, Lahaina, Maui, Hawaii 11. Apr. 1999. [URL: [http://apps1.eere.energy.gov/buildings/energyplus/pdfs/bibliography/energyplus\\_raes99.pdf](http://apps1.eere.energy.gov/buildings/energyplus/pdfs/bibliography/energyplus_raes99.pdf)], abgerufen am 03. Juni 2014.
- [68] CYPRA, S.: *Auswirkungen von Energieeffizienzsertifikaten auf Investitionsentscheidungen im Wohnungsbau*; KIT Scientific Publishing, Karlsruhe 2010.
- [69] DAA GMBH: *Monokristallin, Polykristallin, Dünnschicht und CIGS im Vergleich*; [URL: <http://www.solaranlagenportal.com/solarmodule/systeme/vergleich>], abgerufen am 19. März 2015.
- [70] DANTZIG, G. B.: *Linear Programming under Uncertainty*; in: *Management Science*; Jg. 1 (1955), S. 197–206.
- [71] DEAN, J.: *Capital budgeting. Top-management policy on plant, equipment, and product development*; Columbia University Press, New York 1964.
- [72] DE KRUIJK, H.: *The EU energy and environmental model EFOM-ENV specified in GAMS*; Energy Research Centre of the Netherlands (Hrsg.), Petten 1994.
- [73] DIAKAKI, C. ET AL.: *A multi-objective decision model for the improvement of energy efficiency in buildings*; in: *Energy - The International Journal*; Jg. 35 (2010), S. 5483–96.
- [74] DIAKAKI, C. ET AL.: *Towards a multi-objective optimization approach for improving energy efficiency in buildings*; in: *Energy and Buildings*; Jg. 40 (2008), S. 1747–54.

- [75] DIEFENBACH, N.: *Basisdaten für Hochrechnungen mit der Deutschen Gebäudetypologie des IWU. Neufassung Oktober 2013*; Institut Wohnen und Umwelt GmbH (Hrsg.), Darmstadt 2013.
- [76] DIEFENBACH, N. / CISCHINSKY, H.: *Was ist eigentlich die energetische Sanierungsrate?*; in: *Energiewirtschaftliche Tagesfragen*; Jg. 65 (2015), S. 51–53.
- [77] DIEFENBACH, N. ET AL.: *Datenbasis Gebäudebestand. Datenerhebung zur energetischen Qualität und zu den Modernisierungstrends im deutschen Wohngebäudebestand*; Institut Wohnen und Umwelt GmbH und Bremer Energie Institut (Hrsg.), Darmstadt 2010.
- [78] DIEFENBACH, N. ET AL.: *Kurzgutachten zu einem Sanierungsfahrplan im Wohngebäudebestand*; Institut Wohnen und Umwelt GmbH (Hrsg.), Darmstadt 2013.
- [79] DINKELBACH, A.: *Ertragsteuern. Einkommensteuer, Körperschaftsteuer, Gewerbesteuer*; Gabler, Wiesbaden 2012.
- [80] DISCHER, H. ET AL.: *dena-Sanierungsstudie. Teil 1: Wirtschaftlichkeit energetischer Modernisierung im Mietwohnungsbestand*; Deutsche Energie-Agentur GmbH (Hrsg.), Berlin 2010.
- [81] DJURIC, N. ET AL.: *Optimization of energy consumption in buildings with hydronic heating systems considering thermal comfort by use of computer-based tools*; in: *Energy and Buildings*; Jg. 39 (2007), S. 471–77.
- [82] DOMSCHKE, W. / DREXL, A.: *Einführung in Operations Research*; Springer, Berlin 2007.
- [83] DOMSCHKE, W. / SCHOLL, A.: *Grundlagen der Betriebswirtschaftslehre. Eine Einführung aus entscheidungsorientierter Sicht*; Springer, Berlin 2008.
- [84] DÜNGEN, H.: *Zwei Dekaden deutscher Energie- und Umweltpolitik. Leitbilder, Prinzipien und Konzepte*; in: Hohensee, M. / Salewski, M. (Hrsg.): *Energie - Politik - Geschichte. Nationale und internationale Energiepolitik seit 1945*; F. Steiner, Stuttgart 1993, S. 35–50.
- [85] DVGW - DEUTSCHER VEREIN DES GAS- UND WASSERFACHES E. V. (HRSG.): *Arbeitsblatt W 551*; Bonn 2004.
- [86] EEX - EUROPEAN ENERGY EXCHANGE AG: *KWK Index*; [URL: <http://www.eex.com/de/marktdaten/strom/spotmarkt/kwk-index/kwk-index-download>], abgerufen am 28. Okt. 2014.
- [87] EISENHOWER, B. ET AL.: *A methodology for meta-model based optimization in building energy models*; in: *Energy and Buildings*; Jg. 47 (2012), S. 292–301.

- [88] ELLIS, P. G. ET AL.: *Automated multivariate optimization tool for energy analysis*; IBPSA SimBuild 2006 Conference, Cambridge, Massachusetts 02. Aug. 2006. [URL: <http://www.osti.gov/scitech/servlets/purl/887339>], abgerufen am 28. Mai 2014.
- [89] ENSELING, A.: *Leitfaden zur Beurteilung der Wirtschaftlichkeit von Energiesparinvestitionen im Gebäudebestand*; Institut Wohnen und Umwelt GmbH (Hrsg.), Darmstadt 2003.
- [90] ENSELING, A. / HINZ, E.: *Wirtschaftlichkeit energiesparender Maßnahmen im Bestand vor dem Hintergrund der novellierten EnEV*; Institut Wohnen und Umwelt GmbH (Hrsg.), Darmstadt 2008.
- [91] ENSELING, A. / HINZ, E.: *Energiebilanz- und Wirtschaftlichkeitsberechnungen für ein vermietetes Mehrfamilienhaus im Bestand Holbeinstrasse 3-5-7, Rüsselsheim*; Institut Wohnen und Umwelt GmbH (Hrsg.), Darmstadt 2009.
- [92] ENSELING, A. ET AL.: *Akteursbezogene Wirtschaftlichkeitsberechnungen von Energieeffizienzmaßnahmen im Bestand. Berechnungen mit dem vollständigen Finanzplan*; Institut Wohnen und Umwelt GmbH (Hrsg.), Darmstadt 2013.
- [93] ESA<sup>2</sup> - ENERGY SYSTEM ANALYSIS AGENCY (HRSG.): *Shaping our energy system – combining European modelling expertise. Case studies of the European energy system in 2050*; Karlsruhe 2013.
- [94] EBER-FREY, A.: *Analyzing the regional long-term development of the German power system using a nodal pricing approach*; KIT, Karlsruhe 2012.
- [95] EUPD RESEARCH (HRSG.): *Photovoltaik-Preismonitor Deutschland*; Bonn 2013.
- [96] EVINS, R.: *A review of computational optimisation methods applied to sustainable building design*; in: *Renewable and Sustainable Energy Reviews*; Jg. 22 (2013), S. 230–45.
- [97] FACHINFORMATIONSZENTRUM KARLSRUHE GMBH (HRSG.): *Thermochemische Speicher*; BINE Informationsdienst, Projektinfos 2/01; Bonn 2001.
- [98] FEIST, W.: *Wirtschaftlichkeitsuntersuchung ausgewählter Energiesparmaßnahmen im Gebäudebestand*; Passiv-Haus-Institut (Hrsg.), Darmstadt 2001.
- [99] FEURICH, H. ET AL.: *Sanitär-Technik Band 2*; Krammer, Düsseldorf 2011.
- [100] FICHTNER, W.: *Strategische Optionen der Energieversorger zur CO<sub>2</sub>-Minderung. Ein Energie- und Stoffflussmodell zur Entscheidungsunterstützung*; Erich Schmidt, Berlin 1999.

- 
- [101] FINANZEN.DE: *Solarversicherung*; [URL: <http://www.finanzen.de/photovoltaikversicherung/solarversicherungen>], abgerufen am 13. Nov. 2014.
- [102] FINON, D.: *Optimisation model for the French energy sector*; in: *Energy Policy*; Jg. 2 (1974), S. 136–51.
- [103] FISHBONE, L. G. / ABILOCK, H.: *Markal, a linear-programming model for energy systems analysis: Technical description of the bnl version*; in: *International Journal of Energy Research*; Jg. 5 (1981), S. 353–75.
- [104] FISHER, I.: *The theory of interest, as determined by impatience to spend income and opportunity to invest it*; The Macmillan Company, New York 1930.
- [105] FORUM FÜR ENERGIEMODELLE UND ENERGIEWIRTSCHAFTLICHE SYSTEMANALYSEN IN DEUTSCHLAND (Hrsg.): *Energiemodelle zum Klimaschutz in Deutschland. Strukturelle und gesamtwirtschaftliche Auswirkungen aus nationaler Perspektive*; Physica, Heidelberg 1999.
- [106] FORUM FÜR ENERGIEMODELLE UND ENERGIEWIRTSCHAFTLICHE SYSTEMANALYSEN IN DEUTSCHLAND (Hrsg.): *Energiemodelle zum Kernenergieausstieg in Deutschland. Effekte und Wirkungen eines Verzichts auf Strom aus Kernkraftwerken*; Physica, Heidelberg 2002.
- [107] FORUM FÜR ENERGIEMODELLE UND ENERGIEWIRTSCHAFTLICHE SYSTEMANALYSEN IN DEUTSCHLAND (Hrsg.): *Energiemodelle zum europäischen Klimaschutz. Der Beitrag der deutschen Energiewirtschaft*; Lit Verlag, Münster 2004.
- [108] FORUM FÜR ENERGIEMODELLE UND ENERGIEWIRTSCHAFTLICHE SYSTEMANALYSEN IN DEUTSCHLAND (Hrsg.): *Energiemodelle zum Klimaschutz in liberalisierten Energiemärkten. Die Rolle erneuerbarer Energieträger*; Lit Verlag, Münster 2004.
- [109] FORUM FÜR ENERGIEMODELLE UND ENERGIEWIRTSCHAFTLICHE SYSTEMANALYSEN IN DEUTSCHLAND (Hrsg.): *Energiemodelle zu Innovation und moderner Energietechnik. Analyse exogenen und endogenen technischen Fortschritts in der Energiewirtschaft*; Lit Verlag, Berlin 2007.
- [110] FRICKE, J. / BECK, A.: *Bauphysik, Wohnen und Energieverbrauch*; in: Rebhan, E. (Hrsg.): *Energiehandbuch. Gewinnung, Wandlung und Nutzung von Energie*; Springer, Berlin 2002, S. 839–59.
- [111] FUHS, M.: *Zwei Jahre Speichermarkt*; in: *pv magazine*; Jg. 2 (2014), S. 38–56.
- [112] GDW - BUNDESVERBAND DEUTSCHER WOHNUNGS- UND IMMOBILIENUNTERNEHMEN E. V. (HRSG.): *Risiko-Managementsystem im Wohnungsunternehmen*; Hammonia-Verlag, Hamburg 2000.

- [113] GDW - BUNDESVERBAND DEUTSCHER WOHNUNGS- UND IMMOBILIENUNTERNEHMEN E. V. (HRSG.): *Energieeffizientes Bauen und Modernisieren. Gesetzliche Grundlagen, EnEV 2009, Wirtschaftlichkeit*; Hammonia-Verlag, Hamburg 2010.
- [114] GERBRACHT, H. ET AL.: *Optimierung urbaner Energiesysteme*; in: Möst, D. et al. (Hrsg.): *Energiesystemanalyse*; Universitätsverlag Karlsruhe, Karlsruhe 2009, S. 117–38.
- [115] GLÜCK, B.: *Strahlungstemperatur der Umgebung*; in: *Gesundheits-Ingenieur: Haustechnik, Bauphysik, Umwelttechnik*; Jg. 118 (1997), S. 305–9.
- [116] GÖBELT, M.: *Entwicklung eines Modells für die Investitions- und Produktionsprogrammplanung von Energieversorgungsunternehmen im liberalisierten Markt*; Universität Karlsruhe, Karlsruhe 2001.
- [117] GÖTZE, U.: *Investitionsrechnung. Modelle und Analysen zur Beurteilung von Investitionsvorhaben*; Springer, Berlin 2008.
- [118] GROBE, S. / WINGENDER, J.: *Mikrobiologische Trinkwasserqualität in der Wasserverteilung bei veränderten Temperaturen aufgrund des Klimawandels*; Projektbüro dynaklim (Hrsg.), Essen 2011.
- [119] GROB, H. L.: *Investitionsrechnung mit vollständigen Finanzplänen*; Vahlen, München 1989.
- [120] GROB, H. L.: *Einführung in die Investitionsrechnung*; Vahlen, München 2006.
- [121] GROßKLOS, M. ET AL.: *Vom Altbau zum Niedrigenergiehaus. Über die Machbarkeit ehrgeiziger Klimaschutzziele im Gebäudebestand von Wohnungsunternehmen*; Institut Wohnen und Umwelt GmbH und Umweltstiftung WWF Deutschland (Hrsg.), Darmstadt 2001.
- [122] GRUNDMANN, H.-R.: *Optimale Investitions- und Finanzplanung unter Berücksichtigung der Steuern*; Universität Hamburg, 1973.
- [123] GUSTAFSSON, S.-I.: *Sensitivity analysis of building energy retrofits*; in: *Applied Energy*; Jg. 61 (1998), S. 13–23.
- [124] GUSTAFSSON, S.-I.: *Mixed integer linear programming and building retrofits*; in: *Energy and Buildings*; Jg. 28 (1998), S. 191–96.
- [125] GUSTAFSSON, S.-I.: *Optimisation and simulation of building energy systems*; in: *Applied Thermal Engineering*; Jg. 20 (2000), S. 1731–41.
- [126] GUSTAFSSON, S.-I. / RÖNNQVIST, M.: *Optimal heating of large block of flats*; in: *Energy and Buildings*; Jg. 40 (2008), S. 1699–1708.

- 
- [127] GUTENBERG, E.: *Grundlagen der Betriebswirtschaftslehre. Band 1: Die Produktion*; Springer, Berlin 1983.
- [128] HAAS-ARNDT, D. / RANFT, F.: *Altbauten sanieren - Energie sparen*; Fraunhofer-IRB-Verlag, Stuttgart 2011.
- [129] HABERSTOCK, L.: *Zur Integrierung der Ertragsbesteuerung in die simultane Produktions-, Investitions- und Finanzierungsplanung mit Hilfe der linearen Programmierung*; Heymanns, Köln 1971.
- [130] HAEGERT, L.: *Der Einfluss der Steuern auf das optimale Investitions- und Finanzierungsprogramm*; Gabler, Wiesbaden 1971.
- [131] HAKE, J.-F. / MARKEWITZ, P. (Hrsg.): *Modellinstrumente für CO<sub>2</sub>-Minderungsstrategien*; Forschungszentrum Jülich GmbH (Hrsg.), Jülich 1997.
- [132] HALLOF, I. J.: *Das Vermieter-Mieter-Dilemma bei der energetischen Gebäudesanierung: eine rechtliche und ökonomische Analyse*; Lexxion, Berlin 2013.
- [133] HASAN, A. ET AL.: *Minimisation of life cycle cost of a detached house using combined simulation and optimisation*; in: *Building and Environment*; Jg. 43 (2008), S. 2022–34.
- [134] HAWKES, A. D. ET AL.: *Techno-economic modelling of a solid oxide fuel cell stack for micro combined heat and power*; in: *Journal of Power Sources*; Jg. 156 (2006), S. 321–33.
- [135] HAX, H.: *Rentabilitätsmaximierung als unternehmerische Zielsetzung*; in: *Zfbf Schmalenbachs Zeitschrift für betriebswirtschaftliche Forschung*; Jg. 15 (1963), S. 337–44.
- [136] HAX, H.: *Investitions- und Finanzplanung mit Hilfe der linearen Programmierung*; in: *Zfbf Schmalenbachs Zeitschrift für betriebswirtschaftliche Forschung*; Jg. 16 (1964), S. 430–46.
- [137] HEGNER, H.-D. / VOGLER, I.: *Energieeinsparverordnung EnEV - für die Praxis kommentiert*; Ernst, Berlin 2002.
- [138] HEINRICHS, H. U.: *Analyse der langfristigen Auswirkungen von Elektromobilität auf das deutsche Energiesystem im europäischen Energieverbund*; KIT Scientific Publishing, Karlsruhe 2013.
- [139] HEISTER, M.: *Rentabilitätsanalyse von Investitionen. Ein Beitrag zur Wirtschaftlichkeitsrechnung*; Westdt. Verlag, Köln 1962.
- [140] HERING, T.: *Investitionstheorie*; Oldenbourg, München 2008.

- [141] HIRSHLEIFER, J.: *On the theory of optimal investment decision*; in: Journal of Political Economy; Jg. 66 (1958), S. 329–52.
- [142] HOHENSEE, M.: *Böswillige Erpressung oder bewußte Energiepolitik? Der Einsatz der Ölwanne 1973/74 aus arabischer Sicht*; in: Hohensee, M. / Salewski, M. (Hrsg.): Energie - Politik - Geschichte. Nationale und internationale Energiepolitik seit 1945; F. Steiner, Stuttgart 1993, S. 153–76.
- [143] HOIER, A. / ERHORN, H.: *Entwicklung und energetische Bewertung alternativer Sanierungsfahrpläne*; in: Institut für Wärme- und Öltechnik (Hrsg.): Energetische Gebäudesanierung in Deutschland; Hamburg.
- [144] HUANG, W. / LAM, H. N.: *Using genetic algorithms to optimize controller parameters for HVAC systems*; in: Energy and Buildings; Jg. 26 (1997), S. 277–82.
- [145] IHLE, C.: *Lüftung und Luftheizung*; Werner, Düsseldorf 1997.
- [146] IHLE, C.: *Klimatechnik mit Kältetechnik*; Werner, Düsseldorf 2006.
- [147] INSTITUT FÜR ENERGIESYSTEME AN DER INTERSTAATLICHEN HOCHSCHULE FÜR TECHNIK BUCHS: *Prüfresultate des Wärmepumpentestzentrums*; [URL: <http://institute.ntb.ch/ies/kompetenzen/waermepumpen-testzentrum-wpz/pruefresultate.html>], abgerufen am 15. Nov. 2014.
- [148] IWU - INSTITUT WOHNEN UND UMWELT GMBH (HRSG.): *Deutsche Gebäudetypologie. Systematik und Datensätze*; Darmstadt 2005.
- [149] IWU - INSTITUT WOHNEN UND UMWELT GMBH (HRSG.): *Wirtschaftlichkeit energie-sparender Maßnahmen für die selbst genutzte Wohnimmobilie und den vermieteten Bestand*; Darmstadt 2008.
- [150] JÄÄSKELÄINEN, V.: *Optimal financing and tax policy of the corporation*; Helsinki Research Institute for Business Economics, Helsinki 1966.
- [151] JACOB, H.: *Neuere Entwicklungen in der Investitionsrechnung*; in: Zeitschrift für Betriebswirtschaft; Jg. 34 (1964), S. 487–507 (Nr. 8) und S. 551–94 (Nr. 9).
- [152] JAGNOW, K. ET AL.: *Die neue Energieeinsparverordnung 2002. Kosten- und verbrauchsoptimierte Gesamtlösungen*; Dt. Wirtschaftsdienst, Köln 2002.
- [153] JIN, Q. / OVEREND, M.: *Facade renovation for a public building based on a Whole-Life Value approach*; First Building Simulation and Optimization Conference, Loughborough, UK 10. Sep. 2012.

- [154] KALLRATH, J.: *Mathematical optimization and the role of modeling languages*; in: Kallrath, J. (Hrsg.): *Modeling Languages in Mathematical Optimization*; Springer US, Boston, MA 2004, S. 3–24.
- [155] KÄMPF, J. H. ET AL.: *A comparison of global optimization algorithms with standard benchmark functions and real-world applications using EnergyPlus*; in: *Journal of Building Performance Simulation*; Jg. 3 (2010), S. 103–20.
- [156] KASCHUB, T. ET AL.: *Steigerung des Elektrizitätseigenverbrauchs von Heim-Fotovoltaikanlagen durch Elektrofahrzeuge*; in: *UmweltWirtschaftsForum*; Jg. 21 (2013), S. 243–50.
- [157] KERN, W.: *Investitionsrechnung*; Poeschel, Stuttgart 1974.
- [158] KfW BANKENGRUPPE: *Förderprodukte für Bestandsimmobilien*; [URL: <https://www.kfw.de/inlandsfoerderung/Privatpersonen/Bestandsimmobilie/F%C3%B6rderprodukte/F%C3%B6rderprodukte-f%C3%BCr-Bestandsimmobilien.html>], abgerufen am 31. Okt. 2014.
- [159] KfW BANKENGRUPPE: *Preisklassenberechnung*; [URL: <https://www.kfw-formularsammlung.de/KonditionenanzeigerINet/pkBerechnung.jsp>], abgerufen am 31. Okt. 2014.
- [160] KfW BANKENGRUPPE (HRSG.): *Anlage zu den Merkblättern. Energieeffizient Sanieren - Kredit (151, 152) und Investitionszuschuss (430). Liste der förderfähigen Maßnahmen*; Frankfurt a. M. 2014.
- [161] KfW BANKENGRUPPE (HRSG.): *Anlage zu den Merkblättern. Energieeffizient Sanieren - Kredit (151/152) und Investitionszuschuss (430). Technische Mindestanforderungen*; Frankfurt a. M. 2014.
- [162] KfW BANKENGRUPPE (HRSG.): *Merkblatt Energieeffizient Sanieren - Ergänzungskredit*; Frankfurt a. M. 2014.
- [163] KIEBLING, C.: *Energieeffizienz für den Mietwohnungsbestand. Rentabilität energetischer Modernisierungsmaßnahmen unter Berücksichtigung der Rahmenbedingungen im Mietwohnungsbestand*; Books on Demand, Norderstedt 2008.
- [164] KLEIN, R. / SCHOLL, A.: *Planung und Entscheidung. Konzepte, Modelle und Methoden einer modernen betriebswirtschaftlichen Entscheidungsanalyse*; Vahlen, München 2011.
- [165] KLEIN, S. A. ET AL.: *TRNSYS 17 a TRaNsient SYstem Simulation program*; Solar Energy Laboratory, University of Wisconsin-Madison, Madison 2009.

- [166] KLUPP, M. / STRUBELT, W.: *Perspektiven der Wohnungsbauinvestitionen in den neuen Ländern*; Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung und Bundesamt für Bauwesen und Raumordnung (Hrsg.), Bonn 2001.
- [167] KNISSEL, J. ET AL.: *Mietrechtliche Möglichkeiten zur Umsetzung von Energiesparmassnahmen im Gebäudebestand*; Energiereferat der Stadt Frankfurt am Main und Institut Wohnen und Umwelt GmbH (Hrsg.), Frankfurt a. M., Darmstadt 2001.
- [168] KOLOKOTSA, D. ET AL.: *Decision support methodologies on the energy efficiency and energy management in buildings*; in: *Advances in Building Energy Research*; Jg. 3 (2009), S. 121–46.
- [169] KREY, V.: *Vergleich kurz- und langfristig ausgerichteter Optimierungsansätze mit einem multi-regionalen Energiesystemmodell unter Berücksichtigung stochastischer Parameter*; Universität Bochum, Bochum 2006.
- [170] KRIMMLING, J.: *Energieeffiziente Gebäude. Grundwissen und Arbeitsinstrumente für den Energieberater*; Fraunhofer-IRB-Verlag, Stuttgart 2010.
- [171] KRÜMMEL, H.-J.: *Grundsätze der Finanzplanung*; in: *Zeitschrift für Betriebswirtschaft*; Jg. 34 (1964), S. 225–40.
- [172] KRUSCHWITZ, L.: *Investitionsrechnung*; Oldenbourg, München 2011.
- [173] KUGELER, K. ET AL.: *Transportieren von Energie*; in: Rebhan, E. (Hrsg.): *Energiehandbuch. Gewinnung, Wandlung und Nutzung von Energie*; Springer, Berlin 2002, S. 674–712.
- [174] LAAGER, F.: *Entscheidungsmodelle. Leitfaden zur Bildung problemangepasster Entscheidungsmodelle und Hinweise zur Realisierung getroffener Entscheidungen*; Verlag Industrielle Organisation, P. Hanstein, Zürich 1978.
- [175] LAUE, H.-J.: *Wärmepumpen*; in: Rebhan, E. (Hrsg.): *Energiehandbuch. Gewinnung, Wandlung und Nutzung von Energie*; Springer, Berlin 2002, S. 418–45.
- [176] LEES, E.: *Energy efficiency obligations – the EU experience*; eceee European Council for an Energy Efficient Economy, Stockholm 2012.
- [177] LEPRICH, U. / SCHWEIGER, A.: *Energieeffizienz und „Weiße Zertifikate“*; Institut für ZukunftsEnergieSysteme gGmbH (Hrsg.), Saarbrücken 2007.
- [178] LIERSCH, K. W. / LANGNER, N.: *Bauphysik kompakt. Wärme - Feuchte - Schall*; Beuth, Berlin 2015.

- 
- [179] LOGA, T. ET AL.: *Energieeffizienz im Wohngebäudebestand. Techniken, Potenziale, Kosten und Wirtschaftlichkeit*; Institut Wohnen und Umwelt GmbH (Hrsg.), Darmstadt 2007.
- [180] LOGA, T. ET AL.: *Deutsche Wohngebäudetypologie Beispielhafte Maßnahmen zur Verbesserung der Energieeffizienz von typischen Wohngebäuden*; Institut Wohnen und Umwelt GmbH (Hrsg.), Darmstadt 2015.
- [181] LOZANO, M. A. ET AL.: *Structure optimization of energy supply systems in tertiary sector buildings*; in: Energy and Buildings; Jg. 41 (2009), S. 1063–75.
- [182] LUSTIG, A.: *Energetische Gebäudesanierung und Steuern*; in: Deloitte - Real Estate News; Nr.2 (2009), S. 9.
- [183] LUTZ, F. A. / LUTZ, V. C.: *The theory of investment of the firm*; Prinnton 1951.
- [184] LÜTZKENDORF, T. ET AL.: *Die Energiewende – Aufgaben und Handlungsmöglichkeiten der Immobilienwirtschaft*; in: iddiw Denkanstöße; Jg. 1 (2013), S. 5–7.
- [185] LÜTZKENDORF, T. ET AL.: *Fortsetzung des Dialogs Bauqualität – Erarbeitung von Lehrmodulen zum Nachhaltigen Bauen zur Unterstützung der Aus- und Weiterbildung der am Bau Beteiligten*; Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung und Bundesamt für Bauwesen und Raumordnung (Hrsg.), Bonn 2008.
- [186] LUX-STEINER, M. C. / WILLEKE, G.: *Strom von der Sonne. Erfolge und Perspektiven der Photovoltaik*; in: Physikalische Blätter; Jg. 57 (2001), S. 47–53.
- [187] MADANSKY, A.: *Inequalities for stochastic linear programming problems*; in: Management Science; Jg. 6 (1960), S. 197–204.
- [188] MAGISTRAT DER WISSENSCHAFTSSTADT DARMSTADT (HRSG.): *Mietspiegel Darmstadt 2010*; Darmstadt 2010.
- [189] MAIER, K. M.: *Risikomanagement im Immobilien- und Finanzwesen. Ein Leitfaden für Theorie und Praxis*; Knapp, Frankfurt a. M. 2007.
- [190] MARTINAITIS, V. ET AL.: *A two-factor method for appraising building renovation and energy efficiency improvement projects*; in: Energy Policy; Jg. 35 (2007), S. 192–201.
- [191] MASSÉ, P. / GIBRAT, R.: *Application of linear programming to investments in the electric power industry*; in: Management Science; Jg. 3 (1957), S. 149–66.

- [192] MASSIE, D. D.: *Optimization of a building's cooling plant for operating cost and energy use*; in: International Journal of Thermal Sciences; Jg. 41 (2002), S. 1121–29.
- [193] MAYER, J. N. / BURGER, B.: *Kurzstudie zur historischen Entwicklung der EEG-Umlage*; Fraunhofer ISE (Hrsg.), Freiburg 2014.
- [194] MERTENS, K.: *Photovoltaik. Lehrbuch zu Grundlagen, Technologien und Praxis*; Fachbuchverlag Leipzig im Carl-Hanser-Verlag, München 2013.
- [195] MESSNER, S.: *User's guide for the matrix generator of Message II. Model description and implementation guide*; International Institute for Applied System Analysis (Hrsg.), Laxenburg 1984.
- [196] MESSNER, S. / STRUBEGGER, M.: *Model-based decision support in energy planning*; in: International Journal of Global Energy Issues; Jg. 12 (1999), S. 196–207.
- [197] MEYHAK, H.: *Simultane Gesamtplanung im mehrstufigen Mehrproduktunternehmen. Ein Modell der dynamischen linearen Planungsrechnung*; Universität Mannheim, Mannheim 1968.
- [198] MICHAELIS, P.: *Ökonomische Instrumente in der Umweltpolitik. Eine anwendungsorientierte Einführung*; Physica, Heidelberg 1996.
- [199] MINISTERIUM FÜR UMWELT, KLIMA UND ENERGIEWIRTSCHAFT BADEN-WÜRTTEMBERG: *Eckpunkte für eine Novellierung des EWärmeG nach Kabinettsbeschluss vom 11. Juni 2013*; [URL: [https://beteiligungsportal.baden-wuerttemberg.de/fileadmin/redaktion/beteiligungsportal/UM/EWaermeG/Eckpunkte\\_EWaermeG.pdf](https://beteiligungsportal.baden-wuerttemberg.de/fileadmin/redaktion/beteiligungsportal/UM/EWaermeG/Eckpunkte_EWaermeG.pdf)], abgerufen am 18. Dez. 2014.
- [200] MÖST, D.: *Zur Wettbewerbsfähigkeit der Wasserkraft in liberalisierten Elektrizitätsmärkten. Eine modellgestützte Analyse dargestellt am Beispiel des schweizerischen Energieversorgungssystems*; Lang, Frankfurt a. M. 2006.
- [201] NAKIĆENović, N. ET AL.: *Global energy. Perspectives*; Cambridge University Press, New York 1998.
- [202] NEDDERMANN, R.: *Energetische Gebäudemodernisierung. Kosten, Wirtschaftlichkeit, CO<sub>2</sub>-Reduktion*; Werner, Köln 2009.
- [203] NEITZEL, M. ET AL.: *Wege aus dem Vermieter-Mieter-Dilemma*; InWIS Forschung & Beratung GmbH (Hrsg.), Bochum 2011.
- [204] NEUMANN, K. / MORLOCK, M.: *Operations-Research*; Hanser, München 2002.

- [205] NGUYEN, A.-T. ET AL.: *A review on simulation-based optimization methods applied to building performance analysis*; in: Applied Energy; Jg. 113 (2014), S. 1043–58.
- [206] NICKEL, S. ET AL.: *Operations Research*; Springer, Berlin 2011.
- [207] NIELSEN, T. R.: *Optimization of buildings with respect to energy and indoor environment*; Danmarks Tekniske Universitet, Lyngby 2002.
- [208] ÖKO-INSTITUT E. V. (HRSG.): *Die Entwicklung der EEG-Kosten bis 2035*; Berlin 2015.
- [209] PAPAMICHAEL, K. / PROTZEN, J.-P.: *The limits of intelligence in design*; 4<sup>th</sup> International Symposium on System Research, Informatics and Cybernetics, Baden-Baden, Deutschland 03. Aug. 1993. [URL: [http://www.cs.virginia.edu/~robins/The\\_Limits\\_of\\_Intelligence.pdf](http://www.cs.virginia.edu/~robins/The_Limits_of_Intelligence.pdf)], abgerufen am 28. Mai 2014.
- [210] PEDERSEN, F.: *A method for optimizing the performance of buildings*; Danmarks Tekniske Universitet, Lyngby 2006.
- [211] PEHNT, M. ET AL.: *Energiebalance. Optimale Systemlösungen für erneuerbare Energien und Energieeffizienz*; IFEU-Institut und Wuppertal Institut (Hrsg.), Heidelberg, Wuppertal 2009.
- [212] PEIPPO, K. ET AL.: *Multivariate optimization of design trade-offs for solar low energy buildings*; in: Energy and Buildings; Jg. 29 (1999), S. 189–205.
- [213] PERNODET CHANTRELLE, F. ET AL.: *Development of a multicriteria tool for optimizing the renovation of buildings*; in: Applied Energy; Jg. 88 (2011), S. 1386–94.
- [214] PERNODET, F. ET AL.: *Use of genetic algorithms for multicriteria optimization of building refurbishment*; 11<sup>th</sup> IBPSA Conference, Glasgow, Scotland 27. Juli 2009. [URL: [http://www.ibpsa.org/proceedings/bs2009/bs09\\_0188\\_195.pdf](http://www.ibpsa.org/proceedings/bs2009/bs09_0188_195.pdf) ], abgerufen am 04. Juni 2014.
- [215] PFENNINGER, S. ET AL.: *Energy systems modeling for twenty-first century energy challenges*; in: Renewable and Sustainable Energy Reviews; Jg. 33 (2014), S. 74–86.
- [216] PFNÜR, A.: *Modernes Immobilienmanagement*; Springer, Berlin 2010.
- [217] PFNÜR, A. ET AL.: *Wirtschaftlichkeitsberechnungen von Klimaschutzinvestitionen in der Wohnungswirtschaft – Clusteranalyse und 25 Szenariofälle*; in: Pfnür, A. (Hrsg.): Arbeitspapiere zur immobilienwirtschaftlichen Forschung und Praxis Band 18; Technische Universität Darmstadt, Darmstadt 2009.

- [218] PFOHL, H.-C. / ARNOLD, U.: *Logistikforschung. Entwicklungszüge und Gestaltungsansätze*; Erich Schmidt, Berlin 1999.
- [219] PISTOHL, W. ET AL.: *Handbuch der Gebäudetechnik. Planungsgrundlagen und Beispiele. Band 1: Allgemeines, Sanitär, Elektro, Gas*; Werner, Köln 2013.
- [220] PISTOHL, W. ET AL.: *Handbuch der Gebäudetechnik. Planungsgrundlagen und Beispiele. Band 2: Heizung, Lüftung, Beleuchtung, Energiesparen*; Werner, Köln 2013.
- [221] REBHAN, E.: *Prinzipielles zur Energie, zu ihren Formen, ihrer Umformung und Nutzung*; in: Rebhan, E. (Hrsg.): *Energiehandbuch. Gewinnung, Wandlung und Nutzung von Energie*; Springer, Berlin 2002, S. 1–68.
- [222] RECKNAGEL, H. / SCHRAMEK, E.-R.: *Taschenbuch für Heizung und Klimatechnik*; Oldenbourg Industrieverlag, München 2011.
- [223] RIVIERE, P. ET AL.: *Preparatory study on the environmental performance of residential room conditioning appliances (airco and ventilation). Draft report of Task 2: Economic and Market analysis*; ARMINES (Hrsg.), Paris 2008.
- [224] ROHDE, C.: *Integration von Nachhaltigkeitsaspekten in Prozesse des immobilienwirtschaftlichen Risikomanagements*; KIT Scientific Publishing, Karlsruhe 2012.
- [225] ROSENBERG, O.: *Investitionsplanung im Rahmen einer simultanen Gesamtplanung*; Heymanns, Köln 1975.
- [226] ROSENOW, J.: *Different paths of change: Home energy efficiency policy in Britain and Germany*; in: European Council for an Energy-Efficient Economy (Hrsg.): *Energy efficiency first: The foundation of a low-carbon society (Proceedings ECEEE 2011 Summer Study)*; Stockholm 2011, S. 261–72.
- [227] ROSENOW, J. ET AL.: *Neue Wege in der Energieeffizienzpolitik*; Positionspapier von Mitgliedern des Think Tank 30, Berlin 2012.
- [228] RÜDIGER PASCHOTTA: *Pufferspeicher*; RP-Energie-Lexikon. [URL: <https://www.energie-lexikon.info/pufferspeicher.html>], abgerufen am 17. Nov. 2014.
- [229] RWI - RHEINISCH-WESTFÄLISCHES INSTITUT FÜR WIRTSCHAFTSFORSCHUNG (HRSG.): *Erstellung der Anwendungsbilanzen 2011 und 2012 für den Sektor Private Haushalte*; Essen 2013.
- [230] SACHVERSTÄNDIGENRAT FÜR UMWELTFRAGEN: *Wege zur 100% erneuerbaren Stromversorgung*; Erich Schmidt, Berlin 2011.

- [231] SACHVERSTÄNDIGENRAT ZUR BEGUTACHTUNG DER GESAMTWIRTSCHAFTLICHEN ENTWICKLUNG: *Verantwortung für Europa wahrnehmen*; Statistisches Bundesamt (Hrsg.), Wiesbaden 2011.
- [232] SAUER, A. / THIELMANN, A.: *Energiespeicher-Monitoring für die Elektromobilität (EMOTOR)*; Fraunhofer ISI (Hrsg.), Karlsruhe 2013.
- [233] SCHÄTZL, L. ET AL.: *Investitionsprozesse im Wohnungsbestand - unter besonderer Berücksichtigung privater Vermieter*; Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung und Bundesamt für Bauwesen und Raumordnung (Hrsg.), Bonn 2007.
- [234] SCHAUERTE, M.: *Die Bestimmungsgründe des Investitionsverhaltens auf dem Mietwohnungsmarkt*; InWIS Forschung & Beratung GmbH (Hrsg.), Bochum 1995.
- [235] SCHMIDT, R. H. / TERBERGER, E.: *Grundzüge der Investitions- und Finanzierungstheorie*; Gabler, Wiesbaden 2006.
- [236] SCHNEEWEIß, C.: *Planung. Band 1: Systemanalytische und entscheidungstheoretische Grundlagen*; Springer, Berlin 1991.
- [237] SCHOLL, A.: *Robuste Planung und Optimierung. Grundlagen, Konzepte und Methoden, experimentelle Untersuchungen*; Physica, Heidelberg 2001.
- [238] SCHÖNFELDER, M.: *Optimierung des Einsatzes brennstoffzellenbasierter Mikro-KWK-Anlagen unter Berücksichtigung des gesteuerten Ladens von Elektrofahrzeugen*; Cuvillier, Göttingen 2013.
- [239] SCHWEIM, J.: *Integrierte Unternehmensplanung*; Bertelsmann, Bielefeld 1969.
- [240] SCOPE ANALYSIS GMBH (HRSG.): *Prognostizierte Fondsrenditen fallen*; in: Überblick über Produkte, Anbieter und Märkte; Nr. 2 (2013).
- [241] SEEBREGTS, A. J. ET AL.: *Energy/environmental modelling using the MARKAL family of models*; International Conference on Operations Research, September 3-5, 2001, Duisburg 2002. [URL: <http://www.ecn.nl/publications/ECN-RX--01-039>], abgerufen am 30. Mai 2013.
- [242] SOLARENERGIE-FÖRDERVEREIN DEUTSCHLAND E. V.: *PV-Ertragsdatenaufnahme*; [URL: [http://www.pv-ertraege.de/pvdaten/sfvpv\\_main\\_entry.html](http://www.pv-ertraege.de/pvdaten/sfvpv_main_entry.html)], abgerufen am 20. Nov. 2014.
- [243] SOLARPRAXIS AG: *Marktübersicht Batteriespeicher für Photovoltaikanlagen*; [URL: <http://www.pv-magazine.de/marktuebersichten/batteriespeicher/>], abgerufen am 27. Juni 2015.

- [244] SPRENGARD, C. ET AL.: *Technologien und Techniken zur Verbesserung der Energieeffizienz von Gebäuden durch Wärmedämmstoffe*; Forschungsinstitut für Wärmeschutz e. V. (Hrsg.), München 2013.
- [245] STACHOWIAK, H.: *Allgemeine Modelltheorie*; Springer, Wien 1973.
- [246] STADT REGENSBURG (HRSG.): *Mietspiegel Regensburg 2012*; Regensburg 2012.
- [247] STATISTISCHES BUNDESAMT (HRSG.): *Gebäude und Wohnungen - Bestand an Wohnungen und Wohngebäuden, Abgang von Wohnungen und Wohngebäuden, Lange Reihen ab 1969 - 2014*; Wiesbaden 2015.
- [248] STENGEL, J.: *Akteursbasierte Simulation der energetischen Modernisierung des Wohngebäudebestands in Deutschland*; KIT Scientific Publishing, Karlsruhe 2014.
- [249] STIES, I. ET AL.: *Handlungsmotive, -hemmnisse und Zielgruppen für eine energetische Gebäudesanierung. Ergebnisse einer standardisierten Befragung von Eigenheimsanierern*; Institut für sozial-ökologische Forschung (Hrsg.), Frankfurt a. M. 2010.
- [250] STOLTE, C. ET AL.: *dena-Sanierungsstudie. Teil 2: Wirtschaftlichkeit energetischer Modernisierung in selbstgenutzten Wohngebäuden. Begleitforschung zum dena-Projekt „Niedrigenergiehaus im Bestand“*; Deutsche Energie-Agentur GmbH (Hrsg.), Berlin 2012.
- [251] STRECK, S.: *Wohngebäudeerneuerung. Nachhaltige Optimierung im Wohnungsbestand*; Springer, Berlin 2011.
- [252] SUHL, L. / MELLOULI, T.: *Optimierungssysteme*; Gabler, Wiesbaden 2013.
- [253] SWOBODA, P.: *Die simultane Planung von Rationalisierungs- und Erweiterungsinvestitionen und von Produktionsprogrammen*; in: Zeitschrift für Betriebswirtschaft; Jg. 35 (1965), S. 148–63.
- [254] TESTORF, L. ET AL.: *KfW/IW Köln Wohngebäudesanierer-Befragung 2010. Hintergründe und Motive zur energetischen Sanierung des Wohnungsbestandes*; KfW und Institut d. dt. Wirtschaft Köln e. V. (Hrsg.), Frankfurt a. M. 2010.
- [255] THOMAS, B.: *Mini-Blockheizkraftwerke. Grundlagen, Gerätetechnik, Betriebsdaten*; Vogel Business Media, Würzburg 2011.
- [256] TIETZE-STÖCKINGER, I.: *Kosteneinsparpotenziale durch Erweiterung von betrieblichen Systemgrenzen dargestellt an Beispielen von Kooperationen aus den Bereichen Energieversorgung und Abfallentsorgung*; Universitätsverlag Karlsruhe, Karlsruhe 2005.

- [257] TRESIDDER, E. ET AL.: *Optimisation of low-energy building design using surrogate models*; 12<sup>th</sup> IBPSA Conference, Sydney 14. Nov. 2011. [URL: [http://www.ibpsa.org/proceedings/BS2011/P\\_1374.pdf](http://www.ibpsa.org/proceedings/BS2011/P_1374.pdf)], abgerufen am 01. Juni 2014.
- [258] URSCHEL, O.: *Risikomanagement in der Immobilienwirtschaft. Ein Beitrag zur Verbesserung der Risikoanalyse und -bewertung*; KIT Scientific Publishing, Karlsruhe 2010.
- [259] USEMANN, K.: *Energieeinsparende Gebäude und Anlagentechnik*; Springer, Berlin 2005.
- [260] VAN DER VOORT, E. ET AL.: *Energy supply modelling package EFOM-12C Mark I. Mathematical description*; Cabay, Louvain-la-Neuve 1984.
- [261] VAN DER ZWAAN, B. / SEEBREGTS, A.: *Endogenous learning in climate-energy-economic models – an inventory of key uncertainties*; in: International Journal of Energy Technology and Policy; Jg. 2 (2004), S. 130–41.
- [262] VERBAND DER SÜDWESTDEUTSCHEN WOHNUNGSWIRTSCHAFT E. V. (HRSG.): *GdW hält dena-Sanierungsstudie für ungeeignet*; in: VerbandsMagazin; Nr. 2 (2011), S. 20–21.
- [263] VERBEECK, G. / HENS, H.: *Energy savings in retrofitted dwellings: economically viable?*; in: Energy and Buildings; Jg. 37 (2005), S. 747–54.
- [264] VERHOOG, M.: *Evaluation des Modernisierungsratgebers*; co2online gGmbH (Hrsg.), Berlin 2012.
- [265] VERIVOX: *Stromtarife für Wärmepumpen*; [URL: <http://www.verivox.de/waermepumpen-stromtarife/>], abgerufen am 18. Okt. 2014.
- [266] VERIVOX: *Verbraucherpreisindex Gas*; [URL: <http://www.verivox.de/verbraucherpreisindex-gas/>], abgerufen am 17. Okt. 2014.
- [267] VERIVOX: *Verbraucherpreisindex Strom*; [URL: <http://www.verivox.de/verbraucherpreisindex-strom/>], abgerufen am 18. Okt. 2014.
- [268] VETTER, M.: *Modellbildung und Regelstrategien für erdgasbetriebene Brennstoffzellen-Blockheizkraftwerke*; Fraunhofer-IRB-Verlag, Stuttgart 2005.
- [269] VFF - VERBAND FENSTER + FASSADE / BF - BUNDESVERBAND FLACHGLAS E. V. (HRSG.): *Mehr Energie sparen mit neuen Fenstern*; Frankfurt, Troisdorf 2014.
- [270] VOLLAND, K. / VOLLAND, J.: *Wärmeschutz und Energiebedarf nach EnEV 2014*; Müller, Köln 2014.

- [271] WAGNER, H. M.: *Global Sensitivity Analysis*; in: Operations Research; Jg. 43 (1995), S. 948–69.
- [272] WALDMANN, J.: *Optimale Unternehmensfinanzierung. Modelle zur integrierten Planung des Finanzierungs- und Leistungsbereiches*; Gabler, Wiesbaden 1972.
- [273] WALLACE, S. W.: *Decision making under uncertainty: Is sensitivity analysis of any use?*; in: Operations Research; Jg. 48 (2000), S. 20–25.
- [274] WANG, W. ET AL.: *Applying multi-objective genetic algorithms in green building design optimization*; in: Building and Environment; Jg. 40 (2005), S. 1512–25.
- [275] WEBER, J. H. / PFISTERER, F.: *Photovoltaik*; in: Rebhan, E. (Hrsg.): *Energiehandbuch. Gewinnung, Wandlung und Nutzung von Energie*; Springer, Berlin 2002, S. 316–64.
- [276] WEINGARTNER, H. M.: *Mathematical programming and the analysis of capital budgeting problems*; Prentice-Hall, Englewood Cliffs (New Jersey) 1963.
- [277] WERNERS, B.: *Grundlagen des Operations Research*; Springer, Berlin 2013.
- [278] WETTER, M.: *GenOpt – a generic optimization program*; 7<sup>th</sup> IBPSA Conference, Rio de Janeiro, Brazil 13. Aug. 2001. [URL: <http://simulationresearch.lbl.gov/wetter/download/IBPSA-2001.pdf>], abgerufen am 01. Juni 2014.
- [279] WETTER, M. / WRIGHT, J.: *Comparison of a generalized pattern search and a genetic algorithm optimization method.*; 8<sup>th</sup> IBPSA Conference, Eindhoven, Netherlands 11. Aug. 2003. [URL: [http://www.inive.org/members\\_area/members\\_dias/pdf/Inive/IBPSA/UFSC89.pdf](http://www.inive.org/members_area/members_dias/pdf/Inive/IBPSA/UFSC89.pdf)], abgerufen am 04. Juni 2014.
- [280] WIEDENMANN, M.: *Risikomanagement bei der Immobilien-Projektentwicklung unter besonderer Berücksichtigung der Risikoanalyse und Risikoquantifizierung*; Books on Demand, Norderstedt 2005.
- [281] WIEDHOFF MEDIA GMBH: *Festgeldzins Vergleich*; 2014. [URL: <http://www.festgeld-zins.org/festgeldzins-vergleich/>], abgerufen am 01. Nov. 2014.
- [282] WILHELM, M.: *Instandhaltungsstrategien unter Berücksichtigung stochastischer Alterungsprozesse. Ein Beitrag zur systematischen Bewirtschaftung von Immobilien*; KIT Scientific Publishing, Karlsruhe 2011.
- [283] WINKELMANN, F. C. ET AL.: *DOE-2 supplement*; University of California und Hirsch & Associates (Hrsg.), Berkeley und Camarillo 1993.

- [284] WOLFF, D. ET AL.: *Felduntersuchung: Betriebsverhalten von Heizungsanlagen mit Gas-Brennwertkesseln*; Institut für Heizungs- und Klimatechnik, Fachhochschule Braunschweig Wolfenbüttel (Hrsg.), Wolfenbüttel 2004.
- [285] WOLSEY, L.: *Integer programming duality: Price functions and sensitivity analysis*; in: *Mathematical Programming*; Jg. 20 (1981), S. 173–95.
- [286] WRIGHT, J. A. ET AL.: *Optimization of building thermal design and control by multi-criterion genetic algorithm*; in: *Energy and Buildings*; Jg. 34 (2002), S. 959–72.
- [287] ZIMMERMANN, H.-J.: *Operations research. Methoden und Modelle*; Vieweg, Wiesbaden 2008.
- [288] ZIMMERMANN, W. / STACHE, U.: *Operations Research. Quantitative Methoden zur Entscheidungsvorbereitung*; Oldenbourg Wissenschaftsverlag, München 2001.
- [289] ZIV - BUNDESVERBAND DES SCHORNSTEINFEGERHANDWERKS ZENTRALINNUNGSVERBAND (HRSG.): *Erhebungen des Schornsteinfegerhandwerks für 2010*; Sankt Augustin 2011.

## Gesetze, Verordnungen und Verwaltungsanweisungen

- AbLaV: Verordnung zu abschaltbaren Lasten vom 28. Dezember 2012 (BGBl. I S. 2998).
- BetrKV: Betriebskostenverordnung vom 25. November 2003 (BGBl. I S. 2346, 2347), die durch Artikel 4 des Gesetzes vom 3. Mai 2012 (BGBl. I S. 958) geändert worden ist.
- BGB: Bürgerliches Gesetzbuch in der Fassung der Bekanntmachung vom 2. Januar 2002 (BGBl. I S. 42, 2909; 2003 I S. 738), das durch Artikel 1 des Gesetzes vom 22. Juli 2014 (BGBl. I S. 1218) geändert worden ist.
- EEG: Erneuerbare-Energien-Gesetz vom 21. Juli 2014 (BGBl. I S. 1066), das zuletzt durch Artikel 1 des Gesetzes vom 22. Dezember 2014 (BGBl. I S. 2406) geändert worden ist.
- EEWärmeG: Erneuerbare-Energien-WärmeGesetz vom 7. August 2008 (BGBl. I S. 1658), das zuletzt durch Artikel 14 des Gesetzes vom 21. Juli 2014 (BGBl. I S. 1066) geändert worden ist.

- EnEG: Energieeinsparungsgesetz in der Fassung der Bekanntmachung vom 1. September 2005 (BGBl. I S. 2684), das zuletzt durch Artikel 1 des Gesetzes vom 4. Juli 2013 (BGBl. I S. 2197) geändert worden ist.
- EnEV: Energieeinsparverordnung vom 24. Juli 2007 (BGBl. I S. 1519), die zuletzt durch Artikel 1 der Verordnung vom 18. November 2013 (BGBl. I S. 3951) geändert worden ist.
- EnWG: Energiewirtschaftsgesetz vom 7. Juli 2005 (BGBl. I S. 1970, 3621), das zuletzt durch Artikel 6 des Gesetzes vom 21. Juli 2014 (BGBl. I S. 1066) geändert worden ist.
- EStG: Einkommensteuergesetz in der Fassung der Bekanntmachung vom 8. Oktober 2009 (BGBl. I S. 3366, 3862), das zuletzt durch Artikel 5 des Gesetzes vom 22. Dezember 2014 (BGBl. I S. 2417) geändert worden ist.
- EWärmeG: Gesetz zur Nutzung erneuerbarer Wärmeenergie in Baden-Württemberg (Erneuerbare-Wärme-Gesetz) vom 20. November 2007 (GBl. Nr. 19 S. 531).
- GewStG: Gewerbesteuerengesetz in der Fassung der Bekanntmachung vom 15. Oktober 2002 (BGBl. I S. 4167), das zuletzt durch Artikel 7 des Gesetzes vom 22. Dezember 2014 (BGBl. I S. 2417) geändert worden ist.
- HeizkostenV: Verordnung über Heizkostenabrechnung in der Fassung der Bekanntmachung vom 5. Oktober 2009 (BGBl. I S. 3250).
- KWKG: Kraft-Wärme-Kopplungsgesetz vom 19. März 2002 (BGBl. I S. 1092), das zuletzt durch Artikel 13 des Gesetzes vom 21. Juli 2014 (BGBl. I S. 1066) geändert worden ist.
- MietRÄndG: Gesetz über die energetische Modernisierung von vermietetem Wohnraum und über die vereinfachte Durchsetzung von Räumungstiteln (Mietrechtsänderungsgesetz) vom 11. März 2013 (BGBl. I S. 434).
- StromNEV: Stromnetzentgeltverordnung vom 25. Juli 2005 (BGBl. I S. 2225), die zuletzt durch Artikel 7 des Gesetzes vom 21. Juli 2014 (BGBl. I S. 1066) geändert worden ist.
- UStAE: Umsatzsteuer-Anwendungserlass vom 1. Oktober 2010 (BStBl I S. 846) aktuelle Fassung mit Stand vom 18. Dezember 2014.
- UStG: Umsatzsteuergesetz in der Fassung der Bekanntmachung vom 21. Februar 2005 (BGBl. I S. 386), das zuletzt durch Artikel 11 des Gesetzes vom 22. Dezember 2014 (BGBl. I S. 2417) geändert worden ist.





## 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](http://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
- Band 7** Sonja Babrowski  
Bedarf und Verteilung elektrischer Tagesspeicher im  
zukünftigen deutschen Energiesystem. 2015  
ISBN 978-3-7315-0306-4
- Band 8** Marius Wunder  
Integration neuer Technologien der  
Bitumenkalthandhabung in die Versorgungskette. 2015  
ISBN 978-3-7315-0319-4
- Band 9** Felix Teufel  
Speicherbedarf und dessen Auswirkungen auf  
die Energiewirtschaft bei Umsetzung der politischen  
Ziele zur Energiewende. 2015  
ISBN 978-3-7315-0341-5
- Band 10** D. Keles, L. Renz, A. Bublitz, F. Zimmermann, M. Genoese,  
W. Fichtner, H. Höfling, F. Sensfuß, J. Winkler  
Zukunftsfähige Designoptionen für den deutschen  
Strommarkt: Ein Vergleich des Energy-only-Marktes  
mit Kapazitätsmärkten. 2016  
ISBN 978-3-7315-0453-5
- Band 11** Patrick Breun  
Ein Ansatz zur Bewertung klimapolitischer Instrumente  
am Beispiel der Metallerzeugung und -verarbeitung. 2016  
ISBN 978-3-7315-0494-8



- Band 12** P. Ringler, H. Schermeyer, M. Ruppert, M. Hayn,  
V. Bertsch, D. Keles, W. Fichtner  
**Decentralized Energy Systems,  
Market Integration, Optimization.** 2016  
ISBN 978-3-7315-0505-1
- Band 13** Marian Hayn  
**Modellgestützte Analyse neuer Stromtarife für  
Haushalte unter Berücksichtigung bedarfsorientierter  
Versorgungssicherheitsniveaus.** 2016  
ISBN 978-3-7315-0499-3
- Band 14** Frank Schätter  
**Decision support system for a reactive management  
of disaster-caused supply chain disturbances.** 2016  
ISBN 978-3-7315-0530-3
- Band 15** Robert Kunze  
**Techno-ökonomische Planung energetischer  
Wohngebäudemodernisierungen: Ein gemischt-  
ganzzahliges lineares Optimierungsmodell auf  
Basis einer vollständigen Finanzplanung.** 2016  
ISBN 978-3-7315-0531-0





In der Dissertation wird ein gemischt-ganzzahliges lineares Optimierungsmodell (MILP) zur Entscheidungsunterstützung von Wohngebäudeeigentümern bei der energetischen Modernisierungsplanung entwickelt und für zwei exemplarische Fallstudien angewendet. Der Ansatz betrachtet simultan die Maßnahmenwahl und -auslegung, den Einsatz der Versorgungsanlagen einschließlich der Möglichkeiten zur Bewirtschaftung von stromerzeugenden Anlagen (KWK und PV) sowie die Wahl der Finanzierungsmittel. Unter Berücksichtigung der relevanten Entscheidungseinflussgrößen und Rahmenbedingungen des Gebäudeeigentümers als Selbstnutzer und/oder Vermieter wird die für ihn aus wirtschaftlicher Sicht vorteilhafteste Handlungsalternative zur energetischen Modernisierung bestimmt. Das ökonomische Bewertungsschema beruht auf einer vollständigen Finanzplanung und erlaubt, staatliche Fördermittel in Form von verschiedenen Zuschüssen und zinsverbilligten Darlehen adäquat in die Analyse einzubeziehen.