

Technische Universität Dresden

Fakultät Umweltwissenschaften

Technische Potenziale regenerativer Energien für die Energieversorgung von Städten – Untersuchung am Fallbeispiel

Dissertation zur Erlangung des akademischen Grades

Doktoringenieur (Dr.-Ing.)

vorgelegt von

Diplom Umweltwissenschaftler Norbert Krauß

Geboren am 26. Oktober 1982 in Grünstadt (Pfalz)

Gutachter:

Prof. Dr. Bernhard Müller (TU Dresden)

Prof. Dr. Matthias Koziol (BTU Cottbus-Senftenberg)

Prof. (Hon.-Prof.) Clemens Deilmann (Leibniz-Institut für ökologische Raumentwicklung
e.V.)

Tag der Verteidigung: 20. April 2020

Danksagung

Bevor ich dem Leser die nachfolgende Dissertation überlasse, möchte ich mich zunächst bei allen bedanken, die mich während meiner Promotionszeit fachlich und moralisch unterstützt haben. Danken möchte ich meinem Doktorvater Herrn Prof. Dr. Bernhard Müller für die konstruktiven Rückmeldungen und die wissenschaftliche Betreuung sowie Herrn Prof. Dr. Matthias Koziol von der BTU Cottbus-Senftenberg für seine fachliche Beratung und die guten inhaltlichen Diskussionen. Meinen Dank auch an Herrn Prof. Clemens Deilmann und besonders an Herrn Dr. Georg Schiller vom Leibniz-Institut für Ökologische Raumentwicklung für die fachlichen Inputs und Unterstützung. Auch meinen ehemaligen sowie neuen Kollegen und Kolleginnen möchte ich an dieser Stelle für die Diskussionen, Ratschläge und die moralische Unterstützung danken.

Neben der fachlichen Unterstützung danke ich vor allem meinen Freunden Ron Dockhorn, Christoph und Christiane Schünemann, Nicole Seidl und Thomas Hochdörfer für den moralischen Beistand und aufmunternden Worte, wenn die Motivation mal fehlte.

Ein großes Dankeschön gilt meinen Eltern, die mich während meiner Dissertation jederzeit bei all meinen Höhen und Tiefen unterstützt haben.

Danke!

Norbert Krauß

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis	IX
Tabellenverzeichnis	XIII
Abkürzungsverzeichnis	XVII
Kurzfassung.....	1
Abstract.....	3
1 Einleitung.....	5
1.1 Forschungsfrage und Zielstellung.....	6
1.2 Forschungskonzept und Aufbau der Arbeit.....	8
2 Grundlagen und Definitionen.....	13
2.1 100 %-Erneuerbare Eigenversorgung.....	13
2.2 Nutzenergie, Endenergie, Verbrauch und Bedarf	14
2.2.1 Nutz- und Endenergie	14
2.2.2 Energieverbrauch und Energiebedarf.....	15
2.3 Lastgang der Energienachfrage und Volatilität regenerativer Energien.....	16
2.4 Wirkungszusammenhänge zwischen Siedlungsstruktur und Energie.....	18
2.4.1 Struktur und Morphologie von Siedlungen.....	19
2.4.2 Siedlungsstrukturen im Kontext von Energieverbrauch und Energieeffizienz	22
2.4.3 Siedlungsstrukturen und Energiebereitstellung	23
3 Das Siedlungsmodell.....	27
3.1 Der Strukturtypenansatz	29
3.1.1 Die Strukturtypen	30
3.1.2 Merkmale und Merkmalsausprägungen der Strukturtypen	32
3.1.3 Herleitung der Strukturtypen	45
3.2 Gebäudevertreter	46
3.2.1 Systematik der Gebäudevertreter.....	46
3.2.2 Merkmale und Merkmalsausprägungen der Gebäudevertreter.....	47
3.2.3 Herleitung der Gebäudevertreter.....	59
4 Energiebedarfsmodell	61
4.1 Heizwärmebedarf privater Haushalte	63
4.1.1 Verfahren zur Berechnung des Heizwärmebedarfs auf städtischer bzw. teilstädtischer Ebene	64
4.1.2 Energiekennwerte	65
4.1.3 Modelle zur Modellierung von Heizlastprofilen	72
4.1.4 Berechnung des Heizwärmebedarfs und Modellierung der Wärmelast im Modell	73
4.2 Energieaufwand für die Bereitstellung von Warmwasser in privaten Haushalten	80

4.2.1	Einflussfaktoren des häuslichen Warmwasserkonsums und dem damit verbundenen Energieverbrauch.....	80
4.2.2	Methode zur Berechnung des Energiebedarfs für Warmwasser	84
4.2.3	Lastprofil des Warmwasserbedarfs.....	85
4.2.4	Berechnung und Modellierung des Warmwasserbedarfs im Modell	86
4.3	Stromverbrauch privater Haushalte	90
4.3.1	Einflussfaktoren	90
4.3.2	Methoden zur Ermittlung des Strombedarfs privater Haushalte	93
4.3.3	Ansätze und Konzepte zur Modellierung von Lastprofilen privater Haushalte	94
4.3.4	Berechnung und Modellierung des Stromverbrauchs privater Haushalte im Modell.....	95
5	Potenziale regenerativer Energien und Energiespeicher	101
5.1	Aktive Nutzung direkter solarer Strahlungsenergie	101
5.1.1	Berechnung der solaren Strahlungsenergie	103
5.1.2	Energetische Nutzung direkter Solarstrahlung mittels Photovoltaik	104
5.1.3	Energetische Wärmenutzung direkter Solarstrahlung	107
5.1.4	Flächen für eine aktive solare Strom- und Wärmebereitstellung	111
5.1.5	Berechnung des PV- und Solarthermiepotenzial im Modell	117
5.2	Energetische Nutzung organischer Abfälle aus dem Siedlungsbereich	119
5.2.1	Aufkommen organischer Siedlungsabfälle privater Haushalte	120
5.2.2	Berechnung des Aufkommens organischer Siedlungsabfälle im Modell	126
5.2.3	Energiebereitstellung aus organischen Siedlungsabfällen privater Haushalte.....	128
5.2.4	Berechnung des energetischen Potenzials im Modell	131
5.3	Energiespeicher.....	133
5.3.1	Stromspeicher	134
5.3.2	Wärmespeicher	136
5.3.3	Integration der Speicher im Modell	140
6	Anwendung des Verfahrens an einem Fallbeispiel	143
6.1	Das Fallbeispiel	143
6.1.1	Bestand und Struktur der Wohngebäude	145
6.1.2	Einwohner- und Haushaltsdaten.....	151
6.1.3	Eingangsdaten und Annahmen zu den Strukturtypen	155
6.1.4	Eingangsdaten regenerativer Energien.....	159
6.1.5	Ergebnisse des Siedlungsmodells	162
6.2	Energiebedarf im Fallbeispiel	162
6.2.1	Gesamtbilanz	163
6.2.2	Warmwasserbedarf	166
6.2.3	Strombedarf.....	167
6.2.4	Heizenergie	167
6.3	Potenzial regenerativer Energien im Fallbeispiel.....	169
6.3.1	Biomasse.....	169
6.3.2	Solarenergie (Photovoltaik)	170
6.3.3	Solarenergie (Solarthermie).....	171

6.4	Bilanzierung der stündlichen Last und der Energiebereitstellung	171
6.4.1	Winter	173
6.4.2	Übergang	174
6.4.3	Sommer	175
6.5	Sensitivitätsanalysen	177
6.5.1	Extremer Winter und extremer Sommer	177
6.5.2	Bauliche Dichte	179
6.5.3	Thermische Verbesserung von Wohngebäuden.....	181
6.5.4	Speicherdimension	182
6.5.5	Zusammenfassung der Sensitivitätsanalysen	184
7	Auswertung und Interpretation	189
7.1	Beitrag regenerativer Energien zur Energieversorgung	190
7.2	Das Verfahren – Umsetzung, Grenzen und Übertragbarkeit.....	194
7.3	Zukünftige Aufgaben und weitere Forschungsfelder	198
8	Literatur	205
9	Anhang	233

Abbildungsverzeichnis

Abb. 1: Modellstruktur – Übersicht (Eigene Darstellung)	10
Abb. 2: Modellstruktur – Fokus Siedlungsmodell (Eigene Darstellung)	28
Abb. 3: Häufigkeit von Bauweisen des Wohngebäudebestands.....	30
Abb. 4: Schematische Darstellungen und Orthofotos der Strukturtypen.....	32
Abb. 5: Wohnungsdichte nach Gemeindetypen des BBSR und abgeleitete Geschossflächenzahl.....	34
Abb. 6: Bandbreite und durchschnittliche Geschossflächenzahl von freistehenden EFH, Reihenhäuser und MFH nach dem Grad der Verstädterung.....	35
Abb. 7: Geschossigkeit von unterschiedlichen Bebauungsformen in Abhängigkeit der Geschossflächendichte.....	37
Abb. 8: Mittlere Anzahl an Vollgeschossen von freistehenden EFH, Reihenhäusern und MFH nach dem Grad der Verstädterung.....	39
Abb. 9: Versiegelungskartierung Berlin (Datenbasis Coenradie, B. & Haag, L. 2012).....	41
Abb. 10: Zusammenhang zwischen dem Anteil der versiegelten Flächen mit Bebauung und der unversiegelten Flächen für Strukturen der Wohnbebauung.....	42
Abb. 11: Anzahl der Vollgeschosse von Wohngebäuden in Abhängigkeit der Anzahl der Wohneinheiten.....	50
Abb. 12: Abmessungen und Parameter für die Gebäudevertreter.....	52
Abb. 13: Anteile von Haushalten nach der Anzahl der Personen und der Größe der Wohnung (in m ²).....	57
Abb. 14: Anzahl Personen je Wohnung in Abhängigkeit der Wohnfläche, differenziert nach Wohngebäuden mit 1-2 und 3 und mehr Wohnungen	58
Abb. 15: Modellstruktur – Fokus Energiebedarfsmodell (Eigene Darstellung).....	62
Abb. 16: Einsatz von Endenergie nach Anwendungsbereichen privater Haushalte	63
Abb. 17: Normierter Energieverbrauch für Heizung in Abhängigkeit der Wohnfläche.....	66
Abb. 18: Potenzfunktion zur Bestimmung des größenabhängigen Faktors f_{nWE}	66
Abb. 19: Normierter Energieverbrauch in Abhängigkeit des Bauzeitraums für Ein- und Mehrfamilienhäuser	68

Abb. 20: Heizenergieverbrauch von Doppel- und Reihenendhäusern sowie Reihenmittelhäusern im Verhältnis zum Heizenergieverbrauch von freistehenden Einfamilienhäusern nach Altersklassen (A-J; A-I und A-H).....	69
Abb. 21: Spezifische Heizenergiekennwerte von Mehrfamilienhäusern in Deutschland, den alten und neuen Ländern	71
Abb. 22: Schemata zur Berechnung der regionalen Heizenergiekennwerte (Eigene Darstellung)	75
Abb. 23: Gegenüberstellung des berechneten Heizenergieverbrauchs für Deutschland mit Bilanzen von DESTATIS (UGR), RWI und BMWi.....	76
Abb. 24: Gegenüberstellung von Stundenfaktoren am Beispiel des Temperaturbereichs 20°C bis 25°C für Einfamilienhäuser	78
Abb. 25: Einfluss der Gewichtung der Stundenfaktoren, am Beispiel der Stundenfaktoren für EFH für den Temperaturbereich -5°C bis -10°C.	79
Abb. 26: Aufteilung des Trinkwasserverbrauchs nach Verwendungszweck in privaten Haushalten	80
Abb. 27: Ausstattungsgrad mit Geschirrspülmaschinen, normierter elektr. Energieverbrauch und Warmwasserverbrauch je Person nach Haushaltsgröße.....	81
Abb. 28: Konsum von Warmwasser im Jahresverlauf	83
Abb. 29: Variation der Temperatur von Frischwasser innerhalb eines Jahres für Brüssel nach Gerin, O. et al. (2014).....	83
Abb. 30: Beispiel eines Warmwasserlastprofils gemäß dem Verfahren der VDI 6002	89
Abb. 31: Aufteilung des Stromverbrauchs der privaten Haushalte nach Anwendungszwecken für das Jahr 2011.....	90
Abb. 32: Stromverbrauch je Haushalt und Person in Abhängigkeit der Haushaltsgröße.....	91
Abb. 33: Anzahl ausgewählter Haushaltsgeräte je 100 Haushalte in Deutschland.....	92
Abb. 34: Normierte Lastprofile für Haushaltskunden nach SLP-Verfahren	98
Abb. 35: Stromverbrauch (in kWh, 1000 kWh/a) mit und ohne Dynamisierung sowie Dynamisierungspolynom.....	99
Abb. 36: Modellstruktur – Fokus Energieangebotsmodell (Eigene Darstellung)	102
Abb. 37: Verluste innerhalb einer PV-Anlage. (Abbildung aus DGS (2013)).....	105

Abb. 38: Monatswerte sowie der Jahresdurchschnitt der Performance Ratio von 174 Solaranlagen in 2014. (Eigene Auswertung; Datenbasis Photon International 2015).....	106
Abb. 39: Wirkungsgrad unterschiedlicher Kollektorbauarten, in Abhängigkeit der Temperaturdifferenz ($t_m - t_a$)	110
Abb. 40: Berechnungsgrundlagen bei aufgeständerten Solarmodulen bzw. Paneelen.....	113
Abb. 41: Solarertrag (in kWh/m ² *a) in Abhängigkeit der Dachausrichtung und Dachneigung sowie die Ertragseinbußen aufgrund der Ausrichtung (in %)	114
Abb. 42: Bandbreite der Dachausrichtungen/Dachart und deren Flächenanteile	116
Abb. 43: Solarenergieeinstrahlung in Abhängigkeit der baulichen Dichte	117
Abb. 44: Spezifisches Aufkommen von Lebensmittelabfällen in Abhängigkeit der Haushaltsgröße.....	124
Abb. 45: Bereitschaftswärmeverlust (in %/h) in Abhängigkeit des Speichervolumens (Nettoinhalt in Liter) auf Basis von Herstellerangaben.....	137
Abb. 46: Modellstruktur – Fokus Anwendung am Fallbeispiel (Eigene Darstellung)....	144
Abb. 47: Geografische Lage des Fallbeispiels Landau in der Pfalz.....	145
Abb. 48: Verteilung der Dachausrichtung für Flächen mit Wohnbebauung (äußerer Ring) und gemischter Bebauung (innerer Ring) in %	148
Abb. 49: Ausrichtung und Anteil der Dachflächen im Fallbeispiel im Vergleich zu Literaturdaten.....	149
Abb. 50: Anzahl der Personen in Wohngebäuden mit 1 und 2 Wohnungen und 3 und mehr Wohnungen in Abhängigkeit der Wohnfläche	152
Abb. 51: Aufteilung der Siedlungsfläche in Strukturtypen nach Einwohnerzahl.....	156
Abb. 52: Globalstrahlung (Monatssummenwerte und Jahressumme in kWh/m ²) auf horizontaler Ebene für das Fallbeispiel	161
Abb. 53: Globalstrahlung (Tagessummenwerte in kWh/m ²) auf horizontaler Ebene für das Fallbeispiel.....	161
Abb. 54: Struktur des Nutzenergiebedarfs.....	163
Abb. 55: Aufteilung von Einwohner, Nettowohnbauland und Energiebedarf auf die Strukturtypen	163
Abb. 56: Energiebedarf und Energiebeitrag regenerativer Energien in der Jahresübersicht.....	172
Abb. 57: Wärmebedarf und Wärmebereitstellung durch regenerative Energien.....	173

Abb. 58: Strombedarf und Strombereitstellung durch reg. Energien für 1 Woche im Januar	174
Abb. 59: Wärmebedarf und Wärmebereitstellung durch regenerative Energien in der Übergangsperiode	174
Abb. 60: Strombedarf und Strombereitstellung durch reg. Energien für 1 Woche im Oktober.....	175
Abb. 61: Wärmebedarf und Wärmebereitstellung durch regenerative Energien für 1 Woche im August	176
Abb. 62: Strombedarf und Strombereitstellung durch reg. Energien für 1 Woche im August	176
Abb. 63: Jahresverlauf der Lufttemperatur (in °C/Tag) für die Referenz-Variante, Extremer Sommer und Extremer Winter	178
Abb. 64: Energiebereitstellung in „Speicher-Variante 1“ im Verhältnis zur Basisvariante des Fallbeispiels	183
Abb. 65: Energiebereitstellung in „Speicher-Variante 2“ im Verhältnis zur Basisvariante des Fallbeispiels	184
Abb. 66: Bilanzielle (Jahresbilanz) und modellierte (nutzbar) Energiebereitstellung durch reg. Energien für die Basisvariante des Fallbeispiels und die Sensitivitätsanalysen.....	184
Abb. 67: Deckungsgrad des Energiebedarfs durch reg. Energien und Faktoren für die Basisvariante des Fallbeispiels und die Sensitivitätsanalysen	185

Tabellenverzeichnis

Tab. 1: Forschungskonzept	9
Tab. 2: Strukturtypen des Siedlungsmodells	31
Tab. 3: Geschossflächendichten (Bandbreiten) nach dem Grad der Verstädterung.....	36
Tab. 4: Anzahl der Vollgeschosse nach der Geschossflächenzahl und der Art der Baulichen Nutzung. (Tabelle aus Blum, A. & Wente, E. (1980) entnommen).....	38
Tab. 5: Anzahl Vollgeschosse (Bandbreiten) nach dem Grad der Verstädterung.....	39
Tab. 6: Bebauungsformen, Gebäudetypen und Bauweisen	40
Tab. 7: Aufteilung der Grün-/Gartenflächen nach Vegetationsflächen in Ein- und Mehrfamilienhausbebauungen.....	44
Tab. 8: Literaturwerte für die Berechnung der Geschossfläche ausgehend von der Wohnfläche.....	48
Tab. 9: Annahmen zur Länge der Giebelseite für verschiedene Gebäudekategorien.	52
Tab. 10: Beispielhafte Gliederung der Haushalte nach Haushaltsgröße, Wohnungsgrößenklassen und Anzahl der Wohnungen in Wohngebäuden	57
Tab. 11: Setzungen der Wohnungsgrößen (in m ²) für die Wohnungsgrößenklassen	58
Tab. 12: Größenabhängige Faktoren zur Anpassung der Heizenergiekennwerte	67
Tab. 13: Baualtersklassenabhängige Entwicklung der Heizenergieverbräuche im Wohngebäudebestand.....	68
Tab. 14: Jahresnutzungsgrade von Heizungsanlagen.....	70
Tab. 15: Parameter der SigLine-Berechnung im Standardlastprofilverfahren	79
Tab. 16: Warmwasserbedarf und Energiebedarf für die Bereitstellung von Warmwasser nach Haushaltsgröße	87
Tab. 17: Normierter Tages-Faktor des Warmwasserbedarfs.....	89
Tab. 18: Normierter Monats-Faktor (f_M) des Warmwasserbedarfs.	89
Tab. 19: Stromverbrauch privater Haushalte (nach EnergieAgentur.NRW (2011)).	96
Tab. 20: Jahreszeitliche Abschnitte im Standardlastprofil-Verfahren.....	97
Tab. 21: Typische Kennwerte für einzelne Kollektorbauarten.....	109
Tab. 22: Performance (%) von PV-Anlagen im Jahresverlauf	118

Tab. 23: Zusammensetzung des Biogutes.....	121
Tab. 24: Zusammensetzung des Hausmülls (Eigene Berechnungen)	122
Tab. 25: Spezifische Flächenerträge von Grünabfällen je m ²	125
Tab. 26: Anteiliges Aufkommen von Küchen- und Nahrungsmittelabfällen im Bio- und Hausmüll	126
Tab. 27: Anschlussgrad nach Siedlungsstruktur.....	127
Tab. 28: Spezifischer Flächenertrag von Grünabfällen	128
Tab. 29: Thermischer und elektrischer Energiebedarf beim Betrieb einer Biogasanlage	129
Tab. 30: Ausgewählte Verfahren zur Aufbereitung von Biogas zu Biomethan.....	130
Tab. 31: Energiekennwerte organischer Substrate und Brennstoffe.....	132
Tab. 32: Kennwerte von Energieerzeugungsanlagen	132
Tab. 33: Speicherdimensionierung in Abhängigkeit des angestrebten solaren Deckungsgrads	138
Tab. 34: Berechnungsansätze zur Bestimmung des Speichervolumens in Abhängigkeit des Anwendungsfalls.....	139
Tab. 35: Annahmen zu den Energiespeichern im Modell	140
Tab. 36: Eingangsdaten für Wohngebäude, Wohnungen und Wohnfläche im Fallbeispiel	146
Tab. 37: Annahmen zur Anzahl und Aufteilung der Vollgeschosse, differenziert nach Gebäudetyp.....	147
Tab. 38: Annahmen zur Länge der Giebel- bzw. Firstseite	147
Tab. 39: Annahmen zum Anteil der Dachformen Flachdach und Satteldach.....	149
Tab. 40: Annahmen zur Neigung von Satteldächern differenziert nach Anzahl der Wohnungen in Wohngebäuden.....	150
Tab. 41: Struktur der Heizungsanlagen und Wärmeversorgung im Fallbeispiel	150
Tab. 42: Haushalte, Haushaltsgrößen, Einwohner und bewohnte Wohnungen nach Größe der privaten Haushalte	151
Tab. 43: Verteilung der Haushaltsgrößen auf die Wohnungen differenziert nach Gebäudegröße und daraus abgeleitete mittlere Belegung	153
Tab. 44: Gegenüberstellung der Wohnungsbelegung mit Ansatz 1 und Ansatz 2	153
Tab. 45: Kennwerte der Gebäudevertreter (Eigene Berechnungen).....	154
Tab. 46: Dachfläche und bebaute Fläche der Gebäudevertreter	155

Tab. 47: Aufteilung der Gebäudevertreter auf die Strukturtypen	158
Tab. 48: Geschossflächendichte differenziert nach Strukturtypen und Wohngebäudetyp.....	158
Tab. 49: Globalstrahlung (in kWh/m ² *a) in Abhängigkeit von Ausrichtung und Dachneigung für das Fallbeispiel.....	160
Tab. 50: Ausgewählte Ergebnisse aus dem Siedlungsmodell.....	162
Tab. 51: Energiebedarfe (Strom, Warmwasserbereitung, Heizwärme) und spezifische Kennwerte der Strukturtypen im Fallbeispiel.....	165
Tab. 52: Bedarf an Warmwasser und Nutzenergie der Gebäudevertreter im Fallbeispiel.....	166
Tab. 53: Nutzenergiebedarf für Warmwasser.....	166
Tab. 54: Energiebedarf für Heizenergie im Fallbeispiel (mittleres Jahr)	168
Tab. 55: Vergleich der Berechnungsergebnisse für den Endenergiebedarf für Raumwärme mit Kennwerten aus Jehling et al. (2015).....	169
Tab. 56: Energetisches Potenzial durch die Nutzung der organischen Abfälle aus privaten Haushalten.....	170
Tab. 57: Potenzial von Photovoltaik-Anlagen bei 100 %iger Nutzung der geeigneten Dachflächen.....	170
Tab. 58: Potenzial von Solarthermie bei 100 %iger Nutzung der geeigneten Dachflächen.....	171
Tab. 59: Grundflächendichte in der Basisvariante und den Sensitivitätsanalysen.....	180
Tab. 60: Mittlere Anzahl der Vollgeschosse in der Basisvariante und den Sensitivitätsanalysen	180
Tab. 61: Wohngebäude ohne Wohnheime, Wohnungen und Wohnfläche, differenziert nach Baualtersklassen, Gebäudevertreter und Bauweise.....	233
Tab. 62: Wohnungen nach Art des Gebäudes, Größe des privaten Haushalts und weitere Merkmale (ohne Wohnungen in Wohnheimen)	234
Tab. 63: Wohnungen nach Art des Gebäudes, Größe des privaten Haushalts und Wohnflächen-Klassen (ohne Wohnungen in Wohnheimen).....	236
Tab. 64: Haushaltgröße (Anzahl der Personen) in Wohngebäuden mit bis zu 2 Wohnungen und 3 und mehr Wohnungen differenziert nach Wohnungsgröße (in 20 m ² -Intervallen).....	236
Tab. 65: Haushaltgröße nach Flächenklassen von Wohnungen und Häufigkeit der Wohnungen in den Flächenklassen (in 20 m ² -Intervallen).....	237

Abkürzungsverzeichnis

a	Jahr
A	Fläche
A/V	Verhältnis aus Gebäudehüllfläche zu Gebäudevolumen
Abb.	Abbildung
ARGE	Arbeitsgemeinschaft für zeitgemäßes Bauen e.V.
BAK	Baualtersklassen
BauNVO	Baunutzungsverordnung
BBR	Bundesamt für Bauwesen und Raumordnung
BBSR	Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung
BDEW	Bundesverband der Energie- und Wasserwirtschaft
BF	Bebaute Fläche
BGW	Bundesverband der deutschen Gas- und Wasserwirtschaft
BHKW	Blockheizkraftwerk
BKG	Bundesamt für Kartographie und Geodäsie
BMU	Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit
BMVBS	Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung
BMWi	Bundesministerium für Wirtschaft und Energie
BTU	Brandenburgisch Technische Universität
ca.	ungefähr
CEC	Climate & Environment Consulting Potsdam GmbH
CO ₂	Kohlendioxid
COS	Cosinus
csv	comma separated value
c _w	mittlere Dichte von Wasser bei Umgebungsdruck
d. h.	das heißt
DENA	Deutsche Energieagentur
DESTATIS	Deutsches statistisches Bundesamt in Wiesbaden
DF	Dachfläche
DF _H	Hälfte der Dachfläche
DG	Dachgeschoss
DGS	Deutsche Gesellschaft für Sonnenenergie e. V.
DH	Doppelhaushälfte
DIN	Deutsches Institut für Normung
DIW	Deutsches Institut für Wirtschaftsforschung e.V.
DVGW	Deutscher Verein des Gas- und Wasserfaches
DWA	Druckwechseladsorption
DWD	Deutscher Wetterdienst
DWW	Druckwasserwäsche
e. V.	eingetragener Verein
EASE	Energetische Aufwertung und Stadtentwicklung
EE	Erneuerbare Energien
EFH	Einfamilienhaus bzw. Einfamilienhäuser
el	elektrisch
EnEV	Energieeinsparverordnung
et al.	et alia entspricht „und andere“

EUROSTAT	Statistische Amt der Europäischen Union
EVU	Energieversorgungsunternehmen
EW	Einwohner/in
EWL	Entsorgungs- und Wirtschaftsbetrieb Landau in der Pfalz
EZH	Ein- und Zweifamilienhaus
f	freistehendes Gebäude
f _{GFI}	Umrechnungsfaktor von Wohnfläche zu Geschossfläche
FM	Frischmasse
FNR	Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e. V.
FS	Firstseite
G	Geschosse
g	gereihtes Gebäude
GeoBasis-DE	Geobasisdaten für Deutschland
Ges	Gesamt
GF	Geschossfläche
GFD	Geschossflächendichte
GFZ	Geschossflächenzahl
GHD	Gewerbe, Handel und Dienstleistung
GIS	Geografisches Informationssystem
GMH	Großes Mehrfamilienhaus
GRD	Grundflächendichte
Grdst	Grundstück
Grünfl.	Grünfläche
GRZ	Grundflächenzahl
GS	Giebelseite
GWh	Gigawattstunde
h	Stunde
H ₂ O	Wasser
ha	Hektar
h _{DG}	Höhe des Dachgeschosses
HEK	Heizenergiekennwert
HH	Haushalt
Hrsg.	Herausgeber
H _T	Transmissionswärmetransferkoeffizient
Hu	Unterer Heizwert
HW	Heizwärmebedarf
i.d.R.	in der Regel
IBA	Internationale Bauausstellung
IEA	International Energy Agency
inkl.	inklusive
IÖR	Instituts für ökologische Raumentwicklung e. V.
IWU	Instituts für Wohnen und Umwelt
JRC	Joint Research Centre
k. A.	keine Angabe
KfW	Kreditanstalt für Wiederaufbau
kg	Kilogramm
km ²	Quadratkilometer

KMH	Kleines Mehrfamilienhaus
kW	Kilowatt
KW	Kundenwert
kWh	Kilowattstunden
KWK	Kraftwärmekopplung
kWp	Kilowatt Peak
l	Liter
LaDAR	laser detection and ranging
Leb	Lebensmittel
L _{FS}	Länge der Firstseite
L _{GS}	Länge der Giebelseite
LiDAR	light detection and ranging
LPG	Lastprofilgenerator
m	Meter
m ²	Quadratmeter
m ³	Kubikmeter
Max.	Maximum
MEA, DEA	Aminwäschen
MFH	Mehrfamilienhaus bzw. Mehrfamilienhäuser
Min.	Minimum
Mio.	Millionen
MMH	Mittleres Mehrfamilienhaus
MWh	Megawattstunden
N	betrachteter Zeitraum
NRW	Nordrheinland-Westfalen
NWBL	Nettowohnbauland
nWG _{Ges}	Gesamtanzahl der Wohngebäude
P	Leistung
Per	Person
PR	Performance Ratio
PV	Photovoltaik
PVGIS	Photovoltaic Geographical Information System
p _w	die spezifische Wärmekapazität
Q _N	Heizwärmebedarf
Q _{Netz}	Leistungsverlust von Wärmenetzen
RH	Reihenhaus
RWI	Rheinisch-Westfälisches Institut für Wirtschaftsforschung
SAENA	Sächsische Energieagentur
SLP	Standard-Last-Profil
SR _{Abs}	Abstand zwischen Solarmodulen
SRU	Sachverständigenrat für Umweltfragen
ST	Solarthermie
STALA RLP	Statistisches Landesamt Rheinland-Pfalz
t	Temperatur
Tab.	Tabelle
TAN	Tangens

th	thermisch
TM	Trockenmasse
TRY	Testreferenzjahre
TU	Technische Universität
TW	Trinkwarmwasser
u. a.	unter anderem
UGR	Umweltökonomische Gesamtrechnung
usw.	und so weiter
U-Wert	Wärmedurchgangskoeffizient in W/m ² K
VAR	Variante
VBA	Visual Basic for Applications (Programmiersprache)
VDEW	Verband der Elektrizitätswirtschaft e. V.
VDI	Verein Deutscher Ingenieure
VG	Vollgeschosse
vgl.	vergleiche
V _w	Menge an Warmwasser
WBGU	Wissenschaftlicher Beirat der Bundesregierung Globale Umweltveränderungen
WE	Wohneinheit
WFI	Wohnfläche
WG	Wohngebäude
Whg	Wohnung
WoFIV	Wohnflächenverordnung
WW	Warmwasser
z. B.	zum Beispiel
ZFH	Zweifamilienhaus
ϑ ₀	Temperatur des Frischwassers
ϑ _w	Temperatur des Warmwassers bei der Entnahme

Kurzfassung

Laut der Bundesregierung soll bis 2050 der Anteil umweltschädlicher Treibhausgase um bis zu 95 % verringert werden (BMWi 2010). Dies kann nur gelingen, wenn auf der einen Seite der Energieverbrauch reduziert wird, z. B. durch Verbesserung der Energieeffizienz technischer Anlagen und die energetische Gebäudesanierung, und auf der anderen Seite der Beitrag regenerativer Energien am Energieverbrauch gesteigert wird. Zur Umsetzung und Bewältigung der damit einhergehenden Herausforderungen kommt den Städten und Gemeinden eine Schlüsselrolle zu. Findet in diesen doch der Großteil des Energieverbrauchs und des umweltschädlichen anthropogenen Ausstoßes von Treibhausgasen statt (Pichler, P.-P. *et al.* 2017).

Vielerorts wurden diesbezüglich erste Weichen gestellt und Maßnahmen zur Reduzierung des Energieverbrauchs aber auch zur Integration regenerativer Energien eingeleitet (Aretz, A. *et al.* 2009). So entstanden u. a. im Rahmen der Nationalen Klimaschutzinitiative (BMU) in den letzten Jahren eine Vielzahl an Energiekonzepten für Gemeinden und Quartiere, allen voran für die Metropolen und Großstädte. Doch neben den Großstädten und den Metropolen kommt gerade den Klein- und Mittelstädten aufgrund ihrer Anzahl und Verankerung in der Fläche eine zentrale Bedeutung bei der Umsetzung der Energiewende in der Breite zu. Aufgrund der vielfältigen Herausforderungen, denen sich Klein- und Mittelstädte gegenübersehen (z. B. Demografischer Wandel, Bevölkerungsabwanderung, Daseinsvorsorge, Klimaanpassung, Energiewende, usw.), bedürfen diese zukünftig einer steigenden Unterstützung bei der Transformation hin zu einer nachhaltigen Energieversorgung. Voraussetzung hierfür ist neben finanziellen und personellen Ressourcen insbesondere auch die Bereitstellung von Informationen, die für eine Entwicklung von Maßnahmen hin zur Transformation notwendig sind, von besonderer Bedeutung. Während für Großstädte und Metropolen bereits eine Vielzahl an Daten und Informationen existieren und immer neue hinzukommen, fehlt es in Klein- und Mittelstädten bzw. in der Fläche an relevanten Informations- und Datenquellen für die Erarbeitung von Energiekonzepten. Infolgedessen werden bei der Erstellung von Konzepten für Klein- und Mittelstädte, insbesondere ländlich geprägten Regionen, häufig regionale oder auch nationale Datenquellen und Durchschnittswerte herangezogen.

Die hierbei verwendeten Verfahren und Softwarelösungen liefern eine breite Spanne unterschiedlicher Ergebnisse, wodurch ein Vergleich zwischen Konzepten und Ergebnissen aber auch zwischen den Gemeinden nur bedingt möglich ist. Trotz des fluktuierenden Charakters der Mehrheit der regenerativen Energieformen werden in den Konzepten nur vereinzelt die zeitlichen Verläufe von Energienachfrage und Energieangebot berücksichtigt. Hierbei beeinflussen gerade diese das Potenzial einer Gemeinde große Teile der

Energienachfrage mit regenerativen Energien zu versorgen und damit unabhängiger von Energieimporten zu werden.

Im Rahmen der Arbeit wurde dahingehend ein Verfahren erarbeitet, mit dessen Hilfe das regenerative Energiepotenzial für die Energieversorgung der Wohnbebauung ermittelt werden kann. Exemplarisch wurden hierfür die Solarenergie und die in organischen Rest- und Abfallstoffen gespeicherte Energie ausgewählt. Dem Angebot solarer und in Biomasse gespeicherter Energie (Kapitel 5) wird der Energiebedarf der Privaten Haushalte für Strom, Warmwasser und Raumwärme gegenübergestellt (Kapitel 4). Gegenüber derzeit gängigen Untersuchungen auf kommunaler Ebene werden hierbei insbesondere die zeitlichen Unterschiede in der Energienachfrage und dem regenerativen Energieangebot durch Last- und Bereitstellungsprofile berücksichtigt. Grundlage der Berechnungen von Energiebedarf und regenerativem Energieangebot bildet das Siedlungsmodell (Kapitel 3), welches den Wohngebäudebestand und die damit verbundene Flächennutzung u. a. auf Basis von amtlichen Statistiken und frei zugänglichen Daten beschreibt. Anhand eines Fallbeispiels wird der Ansatz demonstriert (Kapitel 6) und mittels Sensitivitätsstudien der Einfluss sowie Wirkungszusammenhänge ausgewählter Parameter näher beleuchtet. Abschließend werden im Kapitel 7 die Ergebnisse ausgewertet, interpretiert sowie ein Fazit gezogen.

Aus den gewonnenen Erkenntnissen zeigt sich, dass Berechnungen zum regenerativen Energiepotenzial auf Jahresbasis nur eine vergleichsweise geringe Aussagekraft bezüglich des Beitrags zur Energieversorgung zulassen. Demgegenüber weisen Modellierungen auf stündlicher Basis darauf hin, in welchen Zeiträumen, die hier betrachteten, regenerativen Energiequellen (Solarenergie, organische Rest- und Abfallstoffe) einen Beitrag zur Energieversorgung leisten können. Weiterhin zeigt sich, dass das bilanzierte regenerative Energiepotenzial für ein Jahr etwa um den Faktor 3 über dem modellierten Potenzial auf stündlicher Basis liegt.

Abstract

According to the Federal Government, the proportion of polluting greenhouse gases is to be reduced by up to 95% by 2050 (BMW_i 2010). This can only succeed if energy consumption is reduced on the one hand, for example by improving the energy efficiency of technical systems and the energy-efficient refurbishment of buildings, and on the other hand by increasing the contribution of renewable energies to energy consumption. Cities and municipalities have a key role to play in meeting and managing the challenges involved. This is where most of the energy consumption and environmentally harmful anthropogenic emissions of greenhouse gases take place (Pichler et al., 2017).

In many places, the first steps have been taken in this regard and measures to reduce energy consumption but also to integrate renewable energies have been initiated (Aretz et al., 2009). In the last few years, for example, the National Climate Initiative (BMU) has created a large number of energy concepts for municipalities and neighborhoods, especially for the metropolises and large cities. However, in addition to the big cities and the metropolises, small and medium-sized cities in particular have a central role in the implementation of the energy transition in terms of their number and anchoring in the area. Due to the many challenges faced by small and medium-sized cities (e. g. demographic change, services of general interest, climate change, energy transition, etc.), these will in future require increased support for the transition to a sustainable energy supply. This requires, in addition to the necessary financial and human resources, the provision of information required for the development of transformation measures.

While a large amount of data and information already exists for large cities and metropolises and more and more are added, in small and medium-sized cities and also in the rural area there is a lack of relevant information and data sources for the development of energy concepts. As a result, regional and national data sources and averages are often used in developing concepts for small and medium-sized towns and also especially for rural areas. The methods and software solutions used here provide a wide range of different results, which makes a comparison between concepts and results but also between the municipalities only possible to a limited extent. Despite the fluctuating nature of the majority of renewable forms of energy, only a few concepts take into account the time profile of energy demand and energy offer. Especially the load profiles and supply profiles influence the potential of a community to cover large parts of the energy demand with renewable energies and to become less dependent on energy imports.

Within the scope of this work, a method was developed to determine the renewable energy potential for the energy supply of residential buildings and the inhabitants living in their. Solar energy and the energy stored in organic residues and waste materials were selected as examples. The supply of solar energy and energy stored in biomass (Chapter

5) is compared with the energy requirements of private households for electricity, hot water and space heating (Chapter 4). In contrast to current studies at the municipal level, the temporal differences in energy demand and the renewable energy supply through load and supply profiles are taken into account. The basis for the calculations of energy demand and renewable energy supply is the settlement model (Chapter 3), which describes the housing stock and the associated land use on the basis of official statistics and freely accessible data. The approach is demonstrated on the basis of a case study (Chapter 6) and the influence and effects of selected parameters are examined in more detail by means of sensitivity studies. Finally, the Chapter 7 evaluates and interprets the results and draws a conclusion.

The findings show that the annual calculation of the potential of renewable energies has only a comparatively low informative value with regard to the contribution to the energy supply. On the other hand, models on an hourly basis indicate the periods in which the renewable energy sources under consideration here (solar energy, organic residues and waste materials) can make a contribution to the energy supply. Furthermore, it can be seen that the balanced renewable energy potential for one year is about 3 times higher than the modelled potential on an hourly basis.

1 Einleitung

Um den Klimawandel und die damit einhergehenden Folgen für Mensch und Natur auf ein noch annehmbares Maß zu reduzieren und sogenannte Kipp-Elemente zu vermeiden hat sich die internationale Klimapolitik darauf verständigt, den Ausstoß von Treibhausgasen soweit zu reduzieren, dass die Temperaturerhöhung die Zwei-Grad-Grenze (seit Beginn der Industrialisierung) nicht überschreitet (Wojtysiak, J. 2017). Hierzu sind insbesondere Maßnahmen zur Verringerung des Energieverbrauchs und der Umstieg von fossilen sowie nuklearen Energieträgern auf regenerative Energien notwendig. Zentraler Bestandteil einer solchen Transformation hin zu einer CO₂-armen und mit regenerativen Energien versorgten Volkswirtschaft sind die Städte (IEA 2008, BBSR/BBR (Hrsg) 2017).

2015 lebten in deutschen Städten bereits rund 65 Mio. Einwohner, was zum derzeitigen Zeitpunkt über 75 % der Bevölkerung Deutschlands entsprach - Tendenz steigend. Aufgrund ihrer großen Bedeutung als Wohn-, Arbeits-, Dienstleistungs- und Handelsplatz sind die Städte verantwortlich für den Großteil des Energiekonsums und den damit verbundenen Kohlendioxid-Emissionen (IEA 2008, BBSR/BBR (Hrsg) 2012). Der Erfolg der Energiewende hängt folglich von der Transformation der Städte ab. Dies drückt sich auch in dem Slogan „Global denken – lokal handeln“ aus (Lokale Agenda 21).

Bereits seit Jahren sind Städte daher Gegenstand umfassender wissenschaftlicher Arbeiten. In einer Vielzahl von Studien, Initiativen und Leuchtturmprojekten wurde dahingehend aufgezeigt, wie mögliche transformatorische Maßnahmen zur nachhaltigen, CO₂-freien, -armen oder -neutralen Stadt aussehen und gestaltet werden können bzw. könnten (Fraunhofer-Gesellschaft 2012). Im Fokus standen und stehen jedoch vor allem Großstädte und Metropolen wie Berlin, Hamburg, Freiburg und Frankfurt (Kenkmann, T. *et al.* 2011, Reusswig, F. *et al.* 2014, Schumacher, P. *et al.* 2016). Forschung über diese Städte sowie Praxisanwendungen in ihnen bekommen große Aufmerksamkeit und sind weithin sichtbar.

Auf der anderen Seite gibt es mehrere kleinere Gemeinden und Ortsteile, die bereits hohe Anteile an regenerativen Energien in ihre Energieversorgung integriert haben. Dies sind beispielsweise Gemeinden wie Jühnde¹, Freiamt im Schwarzwald² und Feldheim³. Hierbei handelt es sich häufig um Bioenergie-Dörfer, die aus ihren landwirtschaftlichen Erzeugnissen und Reststoffen Strom und Wärme erzeugen. Ihre Verbrauchsstruktur und der Umstand großer Freiflächen für Windenergie und PV-Anlagen sowie das meist reichhaltige Angebot an Biomasse bietet eine vergleichsweise günstige Ausgangslage für ho-

¹ N. Paul (2016). "Zehn Jahre Bioenergieort - Jühnde 2.0 wird effizienter und flexible." *AKP - Alternative Kommunalpolitik* 1(2016).

² C. Heller (2015). Tangeln zeigt, wie es geht. Ein Dorf stellt (wieder) auf erneuerbare Energien um. Magdeburg.

³ Das Energieautarke Dorf. Online unter: <https://nef-feldheim.info/energieautarkes-dorf/>; online Zugriff: 22.07.2018.

he Anteile regenerativer Energieversorgung. Weit weniger Aufmerksamkeit bekommen dahingehend Klein- und Mittelstädte mit 10 Tsd. bis 100 Tsd. Einwohnern. Dennoch stellen gerade Klein- und Mittelstädte eine nicht zu vernachlässigende Anzahl von Gemeinden dar, die mit ihren Einwohnern und Gebäuden von großer Bedeutung für eine nachhaltige, klima- und energieneutrale Transformation sind. Häufig fehlt es jedoch den Klein- und Mittelstädten aufgrund ihrer Bedeutung als Unter- oder Mittelzentren und den damit verbundenen Aufgaben an ausreichenden Ressourcen (Fachkräfte, Geldmittel, usw.) um umfassende Studien und Projekte selbst durchzuführen oder auch in Auftrag zu geben.

Insgesamt hat die Mehrheit der Kommunen ihre eigene Bedeutung und Verantwortung für die Energiewende akzeptiert und eine aktive Rolle eingenommen. Dahingehend haben in den letzten Jahren eine Vielzahl an Gemeinden Konzepte (Klimaschutzkonzepte, Energiekonzepte, Integrierte Energie- und Klimaschutzkonzepte, Masterplan, usw.) zur Transformation einzelner Quartiere sowie ganzer Gemeinden hin zur Klima- oder Energieneutralität, 100 %-EE Kommune und bis zur Autarkie erarbeitet. Die Energiekonzepte und Potenzialabschätzungen wurden bisher jedoch weitestgehend auf der Grundlage jährlicher Bilanzen ermittelt. Die Dynamiken, denen die Energienachfrage und das Energieangebot durch regenerative Energien unterliegen, wurden nur in einigen Ausnahmefällen berücksichtigt. Wie jedoch bereits in mehreren Untersuchungen (Hall, M. & Geissler, A. 2017, Pflugradt, N. & Muntwyler, U. 2017, Jaszczur, M. *et al.* 2018) belegt wurde, beeinflussen die unterschiedlichen Dynamiken der Energienachfrage (Lastgang) und des Energieangebots in hohem Maße die Erfolgsaussichten einer regenerativen Energieversorgung. Folglich können Studien, die in ihren Untersuchungen nicht auf die Dynamik der Energienachfrage und des Energieangebots eingehen, nur in begrenztem Maße Aussagen und Erkenntnisse für eine weitere Diskussion und Transformation hin zu einer in hohem Maße mit regenerativen Energien versorgten Gemeinde beitragen.

1.1 Forschungsfrage und Zielstellung

Die bislang durchgeführten Konzeptstudien zur Transformation von Gemeinden hin zu einer weitestgehend treibhausgasfreien regenerativen Energieversorgung beruhen i. d. R. auf Jahresbilanzen zur regenerativen Energiebereitstellung und Energienachfrage. Aufbauend auf diesen Studien werden z. B. Zielstellungen, wie die regenerative Eigenversorgung oder die autarke Versorgung ganzer Gemeinden proklamiert. Hierbei wird jedoch außer Acht gelassen, dass der Energieverbrauch und die Erzeugung regenerativer Energien erheblichen zeitlichen Schwankungen unterworfen sind und somit nur Teile des regenerativen Potenzials tatsächlich für die Deckung der Energienachfrage genutzt werden können. Vergleichsweise selten werden bisher Energiespeicher in diesen Konzepten beleuchtet. Potenzialanalysen auf Basis von Jahresbilanzen sind somit nur bedingt aussagekräftig und liefern nur sehr eingeschränkte Grundlagen für die Transformation. Es stellt sich somit die Frage, welchen Einfluss die zeitliche Dynamik der Energie-

nachfrage und des regenerativen Energieangebots, unter Berücksichtigung lokaler technischer Potenziale, auf die Eigenversorgung einer Gemeinde besitzt.

Zur Beantwortung der aufgezeigten Fragestellung, gilt es die Potenziale regenerativer Energien zur Energieversorgung und die Energienachfrage innerhalb einer Gemeinde zu ermitteln, sowie die zeitliche Dynamik und Variabilität beider (regeneratives Energiepotenzial & Energienachfrage) zu untersuchen und gegenüberzustellen. Voraussetzung hierfür ist die Auswahl und Erarbeitung von Bilanzierungs- und Berechnungsmethoden, die es ermöglichen das regenerative Potenzial und die Energienachfrage in einer erforderlichen zeitlich hochaufgelösten Weise (1h-Intervall) zu modellieren. Zentrales Ziel der hier vorliegenden Arbeit ist dahingehend die Erarbeitung eines Modells, welches die erforderlichen Bedingungen erfüllt. Hierzu gehört neben der zeitlich hochaufgelösten Modellierung von Energieangebot und -Nachfrage auch die Berücksichtigung morphologischer Charakteristika der Bebauung. Aufbauend hierauf erfolgt dann die Gegenüberstellung des Potenzials und der Energienachfrage. Die Modellierungen sowie die Gegenüberstellung erfolgt anhand eines Fallbeispiels, auf das zu einem späteren Zeitpunkt eingegangen wird.

Aufgrund des hohen Datenaufkommens, das bei zeitlich hochaufgelösten Angebots- und Nachfrageverläufen entsteht, wurde in der vorliegenden Arbeit mehrere Eingrenzungen bei den zu betrachtenden regenerativen Energiequellen und bei den Anwendungsbereichen der Energienachfrage vorgenommen. Im Fall der regenerativen Energiequellen und Systeme wurde dahingehend die Untersuchung auf solare Energiesysteme (Photovoltaik und Solarthermie) und die energetische Nutzung von organischen Abfall- und Reststoffen aus privaten Haushalten eingegrenzt. Die Auswahl solarer Energiesysteme beruht auf der hohen Akzeptanz von dachmontierten Systemen in der Bevölkerung (Kress, M. & Landwehr, I. 2012, Philipps, S. P. *et al.* 2017). Zudem bieten gerade Siedlungen mit ihrem Angebot an Dachflächen ein hohes Potenzial für die Bereitstellung von Strom und Wärme, das zudem weitestgehend frei von Nutzungskonkurrenzen ist (Eicker, U. & Klein, M. 2014). Die energetische Nutzung von organischen Abfall- und Reststoffen wiederum zeichnet sich gegenüber der Nutzung von Agra- und Forstprodukten durch eine vergleichsweise geringe Nutzungskonkurrenz aus. Darüber hinaus unterliegen die organischen Abfall- und Reststoffe nicht der Tank-Teller-Diskussion und besitzen dahingehend eine höhere Akzeptanz (SRU 2011).

Aufgrund morphologischer Gegebenheiten in Siedlungen (Dachausrichtung, Neigung, Gebäudestellung, Verschattung durch Gebäude, usw.) unterliegt die solare Energiebereitstellung vielfachen Einflüssen (Moraitis, P. *et al.* 2018). Zur Berücksichtigung morphologischer Einflüsse werden i. d. R. aufwendige Simulationen mittels geographischer Informationssysteme, Luftbild- und Laserscanneranalysen mittels Light Detection And Ranging (LiDAR) bzw. Laser Detection And Ranging (LaDAR) Methode und 3D-Modellen

durchgeführt. Da entsprechende Simulationen teils mit erheblichen Ressourcen (Software, Personal, Kosten, Zeit, Hardware, usw.) verbunden sind werden bzw. können entsprechende Berechnungen bisweilen nur in Einzelfällen durchgeführt werden. Ebenfalls häufig anzutreffen ist die Frage nach der Datenverfügbarkeit. Dies betrifft insbesondere Informationen und Daten zur Morphologie und Struktur (bauliche Dichte, Dachausrichtung, Neigung, Gebäudestellung, Verschattung durch Gebäude, usw.) in Siedlungen sowie die Energieverbräuche und regenerativen Energiepotenziale. Dies hat dazu veranlasst in der vorliegenden Arbeit, ergänzend zum Energiemodell ein Siedlungsmodell zu konzipieren, das ausschließlich auf öffentlich verfügbare Daten zurückgreift. Dies beinhaltet u. a. Daten der amtlichen Statistik sowie in Studien publizierte Daten. Die Berechnungen werden darüber hinaus ausschließlich in dem Tabellenkalkulationsprogramm Excel von Microsoft vorgenommen. Hierdurch ist eine breite Anwendung möglich und der Bedarf an ausgewiesenen Softwarelösungen sowie das hierfür benötigte Detailwissen (z. B. Programmiersprache) wird geringgehalten.

Aufbauend auf den zuvor geschilderten Aspekten werden die nachfolgenden Forschungsfragen aufgeworfen:

- Welches Potenzial besitzen Solarenergie und die energetische Nutzung von Reststoffen zur Energieversorgung der Privaten Haushalte unter hochaufgelösten Zeitreihenbetrachtungen?
- Welche Daten sind auf regionaler und lokaler Ebene für Potenzialabschätzungen verfügbar?
- Welche Parameter beeinflussen das Potenzial regenerativer Energien, den Bedarf an Energie und damit den Grad der Eigenversorgung einer Gemeinde?

1.2 Forschungskonzept und Aufbau der Arbeit

Die zuvor aufgeworfenen Forschungsfragen sowie die formulierten Zielstellungen bilden den Rahmen der vorliegenden Arbeit. Im Zentrum der Arbeit steht dahingehend die Erarbeitung einer Herangehensweise mit der die Energienachfrage privater Haushalte sowie das regenerative Energieangebot in der Wohnbebauung in zeitlich hochaufgelöster Form ermittelt und dargelegt werden können. Auf Seiten der Energienachfrage werden die Anwendungsbereiche Raumwärme von Wohngebäuden sowie der Bedarf von Warmwasser und Strom privater Haushalte betrachtet. Auf der Seite der regenerativen Energien wird die solare Strahlungsenergie, unterteilt in Photovoltaik und Solarthermie, und die energetische Nutzung organischer Abfall- und Reststoffe beleuchtet.

Die Berechnung von Energienachfrage und regenerativem Energiepotenzial setzen Informationen zur Physis des betrachteten Untersuchungsraums voraus. Dies beinhaltet

Informationen u. a. zum Gebäudebestand (Baualter, Wohnfläche, Gebäudetyp, usw.), zur Morphologie der Bebauung und zur Flächennutzung sowie Informationen zu Haushalten und zur Struktur der Bewohner/innen. Während die Berechnungen zur Energienachfrage vorrangig auf Informationen zu Gebäudetypen, Wohnflächen, Baualtersklassen, Wohnungsgrößen und Haushaltsgrößen beruhen, stellen Informationen z. B. zur Dachform, Dachfläche, baulichen Dichte, Flächennutzung und Bevölkerungszahl für die hier zu untersuchenden regenerativen Energien zentrale Grundlagen dar.

Tab. 1: Forschungskonzept

Forschungsansatz	Modellbetrachtungen am Beispiel einer Fallbeispielstadt und darüber hinaus mit Hilfe von Sensitivitätsanalysen.	
Verfahrensansatz	Siedlungsmodell	Beschreibung der Ausgangssituation, der Nachfrageparameter und der Angebotsparameter.
	Energiebedarfsmodell	Erarbeitung von Kennzahlen für die Bereiche Heizwärme, Trinkwarmwasser und Haushaltsstrom, Formulierung und Darlegung von Berechnungsalgorithmen, Betrachtung des Nachfrageverhaltens
	Energieangebotsmodell	Erarbeitung von Kennzahlen für die regenerativen Energieformen Solarenergie und Biomasse, Formulierung und Darlegung von Berechnungsalgorithmen, Betrachtung der Angebotscharakteristik
Verfahrensanwendung	Berechnungen am Fallbeispiel	Anwendung des Verfahrens an einer Fallbeispielstadt, Vergleich mit vorhandenen Ergebnissen anderer Untersuchungen
	Sensitivitätsanalysen	Variation ausgewählter Parameter und Analyse der resultierenden Wechselwirkungen, Herausstellen von Wirkungszusammenhängen
Interpretation und Ergebnisse	Überprüfen der Forschungsfragen Reflexion des Verfahrens Nutzen für die Planung / Transformation	

Dahingehend wird in einem ersten Schritt ein Siedlungsmodell erarbeitet (vergleiche Abb. 1), mit dessen Hilfe die zuvor genannten Informationen bereitgestellt werden können (Kapitel 3). Grundlage bilden empirische Daten, Kennwerte aus der Literatur sowie daraus abgeleitete Kennwerte. Um eine Vergleichbarkeit gewähren zu können und zudem die Problematik der Datenverfügbarkeit zu minimieren, sollen im Siedlungsmodell ausschließlich öffentlich verfügbare Daten der amtlichen Statistik sowie Informationen aus bereits publizierten Veröffentlichungen einfließen. Zur Verbesserung der Ergebnisse können darüber hinaus aber auch spezifische Daten einfließen. Im Siedlungsmodell selbst wird der Strukturtypenansatz verfolgt.

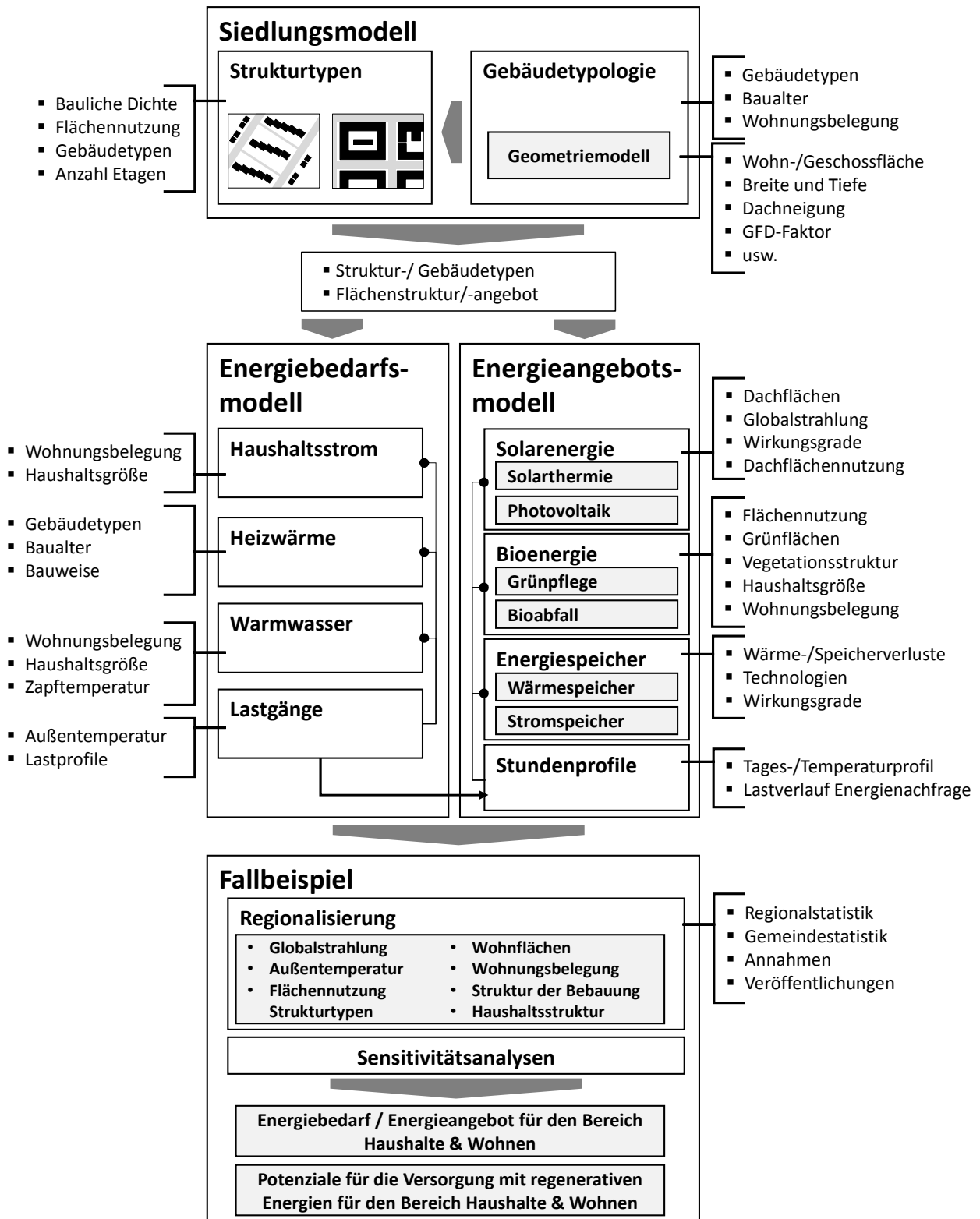


Abb. 1: Modellstruktur – Übersicht (Eigene Darstellung)

Für die Berechnung der Energienachfrage (vergleiche Abb. 1) erfolgt zunächst eine Literaturrecherche in der potenzielle Berechnungsansätze und deren Datengrundlagen für die einzelnen Anwendungsbereiche (Raumwärme, Warmwasser und Haushaltsstrom)

dargelegt werden (Kapitel 4). Dies umfasst die Berechnung des absoluten Energiebedarfs sowie die anschließende Modellierung von Lastgängen (1-h-Takt). Gleiches gilt auch für die Untersuchung der Potenziale (vergleiche Abb. 1) der Solarenergie und der energetischen Nutzung organischer Siedlungsabfälle (Kapitel 5). Zunächst erfolgt eine Berechnung der solarenergetisch nutzbaren Flächen sowie der verwertbaren organischen Siedlungsabfälle privater Haushalte. Da auf Modellierungen mittels 3D-Daten, Laserscanner-Daten oder Satellitenbilder verzichtet wird, sollen im Rahmen einer Literaturrecherche flächen- und energieangebotsmindernde Faktoren identifiziert und für die Berechnungen abgeleitet werden. Die Solarenergie wird in die Bereitstellung von Strom (Photovoltaik) und Wärme (Solarthermie) unterteilt. Für beide erfolgt eine Modellierung stündlicher Angebotsprofile. Bei der energetischen Nutzung organischer Siedlungsabfälle werden verschiedene energetische Nutzungspfade diskutiert.

Bedingt durch die hohe Volatilität regenerativer Energien, insbesondere der von Solarenergie, kommt der Integration elektrischer und thermischer Energiespeicher eine zentrale Rolle in den zukünftigen Energiesystemlösungen zu. Aufgrund dessen werden in der vorliegenden Arbeit Speichersysteme in vereinfachter Form in die Untersuchungen aufgenommen (Kapitel 5.3). Insgesamt wurde für die Berechnungen der Energienachfrage und des regenerativen Energieangebots ein Betrachtungszeitraum von einem Jahr festgelegt.

Der erarbeitete Berechnungsansatz wird abschließend an einem Fallbeispiel (vergleiche Abb. 1) angewendet (Kapitel 6). Durch die Anwendung des Verfahrens an dem Fallbeispiel soll beispielhaft veranschaulicht werden welche theoretisch-technischen Potenziale und welcher Grad der Eigenversorgung im Bereich Wohnen möglich wäre. Weiterhin sollen anhand von Sensitivitätsanalysen Rückschlüsse zu den Wechselwirkungen und Wirkungszusammenhängen der zugrunde liegenden Parameter untersucht werden. Ziel ist es Kenngrößen und Schlussfolgerungen zu generieren, die es ermöglichen anhand einzelner Indikatoren Aussagen zum Potenzial regenerativer Energien und der Eigenversorgung zu treffen.

Bevor jedoch in die Modellbildung und Modellierung eingestiegen wird, wird zunächst im folgenden Kapitel (Kapitel 2) der wissenschaftliche Diskurs entlang ausgewählter Begrifflichkeiten dargelegt.

2 Grundlagen und Definitionen

Im Kapitel „Grundlagen und Definitionen“ wird auf Hintergründe und Begrifflichkeiten eingegangen, die für das weitere Verständnis in der vorliegenden Arbeit von Bedeutung sind.

2.1 100 %-Erneuerbare Eigenversorgung

Wie bereits zuvor dargelegt, bedarf es zur Umsetzung der Klimawende regionaler und lokaler Anstrengung. Eine zentrale Rolle kommt hierbei den Kommunen zu. Während auf nationaler Ebene ein Anteil regenerativer Energien von 60 % an der Bruttoenergiebereitstellung angestrebt wird, gewinnen auf kommunaler und regionaler Ebene zunehmend Konzepte zur 100 %-EE Selbstversorgung bzw. Energieautarkie an Interesse und Zuspruch (Aretz, A. *et al.* 2009, IdE 2012, Deutschle, J. *et al.* 2015, McKenna, R. *et al.* 2015). Einer Transformation, von einer weitestgehenden fossilen zu einer regenerativen Energieversorgung auf lokaler bzw. regionaler Ebene stehen erhebliche Herausforderungen gegenüber. Bei diesen Herausforderungen handelt es sich z. B. um die hohe Volatilität von Solar- und Windenergie, die generelle Schwierigkeit der Speicherung regenerativer Energien, die ungleichmäßige Verteilung, Fragen der Versorgungssicherheit, Akzeptanz von regenerativen Energien sowie Fragen zur sozialverträglichen Energieversorgung (Aretz, A. *et al.* 2009).

Demgegenüber werden mit einer Umstellung auf eine regenerative Energieversorgung auch erhebliche Chancen gesehen. So versprechen sich Kommunen durch die Umstellung eine größere Unabhängigkeit von Energieimporten, eine Steigerung der lokalen bzw. regionalen Wertschöpfung, mehr Entscheidungsfreiheit bzw. größere Mitbestimmung bei der Gestaltung der Energieversorgung, Schaffung von Arbeitsplätzen sowie die Reduzierung der Umweltverschmutzung (Aretz, A. *et al.* 2009, Hirschl, B. *et al.* 2010).

Bislang konnte eine vollständige regenerative Energieversorgung von Kommunen nur vereinzelt (z. B. Jühnde und Feldheim) und hier auch ausschließlich bilanziell erreicht werden (Aretz, A. *et al.* 2009). Am häufigsten werden bilanzielle Eigenversorgungen mit regenerativen Energien im Strombereich erreicht. Für die Bereiche Wärme (Heiz- und Prozesswärme) sowie Kraftstoffe werden hingegen seltener bilanzielle Eigenversorgungen mit regenerativen Energien erreicht. Unter bilanziell wird somit die rechnerische Summe an Energie verstanden, die z. B. über ein ganzes Jahr (Jahresbilanz) hinweg bereitgestellt und mit dem Energieverbrauch, hier z. B. der Kommune, verglichen wird. Nicht berücksichtigt wird hierbei der reale Lastbezug. Infolgedessen wird die Differenz aus der realen Last und der tatsächlichen Bereitstellung regenerativer Energien (Residuallast = Last > Bereitstellung) über das öffentliche Verbundnetz ausgeglichen. Der Begriff der Eigenversorgung wiederum beschreibt den Umstand, dass Energie in einer Energieanlage erzeugt wird und diese vom Erzeuger auch verbraucht wird. Somit ist der Erzeuger

gleichzeitig auch der Verbraucher. Überschüssige Energie, z. B. bei Strom, kann in das öffentliche Netz eingespeist und fehlende Energie (z. B. Strom) kann aus dem öffentlichen Netz entnommen werden (McKenna, R. *et al.* 2015, Winkler, J. *et al.* 2016). Eine vergleichbare Formulierung findet sich auch in Peter, S. (2013) und Fichtner, W. *et al.* (2012), wohingegen Peter den Begriff „bilanzielle“ Autarkie verwendet. Wird demgegenüber eine vollständige Energieversorgung ohne Bezug von Energie von außerhalb des betrachteten Systems (z. B. die Gemeinde) angestrebt bzw. ist das betrachtete System z. B. nicht an das öffentliche Stromnetz angebunden, dann handelt es sich laut Peter, S. (2013) um eine „echte“ bzw. Insel-Autarkie und laut McKenna, R. *et al.* (2015) um eine „harte“ Energieautarkie. Zur Sicherstellung der Energieversorgung mit regenerativen Energien zu jedem Zeitpunkt, sind somit bei einer „echten“ bzw. „harten“ Autarkie unbedingt Energiespeicher einzubeziehen.

Wie aus den Beschreibungen hervorgeht sind mit den unterschiedlichen Formen der Energieautarkie unterschiedliche Anforderungen verbunden. Zentraler Unterschied zwischen einer „bilanziellen“ und einer „harten“ Autarkie ist die zeitliche Auflösung der Energieerzeugung und Energienachfrage.

Untersuchungen u. a. von Brodecki, L. *et al.* (2017) und Peter, S. (2013) haben jedoch bereits darauf hingewiesen, dass eine Umstellung hin zu einer „harten“ Autarkie mit erheblichen Kosten, technischem Aufwand und einem hohen Ressourcenaufwand verbunden ist und daher aus ökonomischen und Ressourcengesichtspunkten sowie mit Blick auf die Versorgungssicherheit zu hinterfragen sind.

2.2 Nutzenergie, Endenergie, Verbrauch und Bedarf

2.2.1 Nutz- und Endenergie

Für den Betrieb von Haushaltsgeräten, die Bereitstellung von Warmwasser und die Beheizung von Räumen wird Energie aufgewendet. Die hieraus resultierende Raumtemperatur sowie die bereitgestellte Menge an Warmwasser dienen zur Befriedigung der Nutzer/innenbedürfnisse, d. h. der Energieaufwand stellt einen Nutzen bereit. Die hierfür aufgewendete Energiemenge wird als Nutzenergie bezeichnet. Nutzenergie beinhaltet somit die Energiemenge die z. B. im gezapften erwärmten Wasser enthalten ist, das beispielsweise zum Geschirrspülen verwendet wird. Bei einer angenommenen Wassertemperatur von 50°C (VDI 2067 2000) sind dies für einen Liter Wasser 46,5 Wattstunden.

Bevor jedoch der geforderte Nutzen bereitgestellt werden kann, muss das Wasser erhitzt werden, z. B. durch eine Zentralheizung oder einen elektrischen Durchlauferhitzer. Im Fall der zentralen Wärmebereitstellung wird das erwärmte Wasser dann über Rohrleitungen zu der Entnahmestelle geleitet. In beiden Fällen, bei der Erwärmung und dem Transport, kommt es zu (Wärme-)Verlusten. Die Höhe der Verluste sind hierbei abhängig von der eingesetzten Anlagentechnik, der Dämmung der Rohrleitungen und deren Länge so-

wie weiterer Faktoren. Damit dennoch der gewünschte Nutzen (1 Liter Wasser mit 50°C) bereitgestellt werden kann, müssen die Verluste ausgeglichen werden. Der hierfür aufgewendete Energieeinsatz zusammen mit der Nutzenergie wird als Endenergie bezeichnet. Im Rahmen der nachfolgenden Untersuchungen und Berechnungen wird der Nutzenergieaufwand ausgewiesen.

2.2.2 Energieverbrauch und Energiebedarf

Der gemessene Energieaufwand der für Beheizung, Warmwasser oder Strom eingesetzt wird, wird als Energieverbrauch bezeichnet. Der Energieverbrauch gibt den realen Energieeinsatz, i. d. R. über einen Messzeitraum von einem Jahr wieder. Er wird beeinflusst u. a. durch das Verhalten sowie die Anforderungen der Nutzer/innen, die Witterungsbedingungen und die technischen Eigenschaften der Anlage bzw. des Endgerätes. Um mögliche Ausreißer auszugleichen wird der durchschnittliche Verbrauch der letzten drei Jahre oder mehr gebildet (VDI 4661 2003).

Häufig jedoch liegen keine Daten zu den realen Energieverbräuchen vor, sei es aufgrund fehlender Messungen oder dass die entsprechenden Daten nicht verfügbar sind. Sollen dennoch Aussagen zum Energieaufwand getroffen werden, z. B. zum Wärmeverbrauch eines Wohngebäudes oder zum Stromverbrauch eines Haushalts, dann müssen die Energieaufwendungen mittels mathematischer Verfahren abgeschätzt werden. Die zur Anwendung kommenden Berechnungsverfahren basieren i. d. R. auf physikalischen Gesetzen und Eigenschaften sowie angenommenen Rahmenbedingungen die u. a. das Nutzer/innenverhalten, die Witterungsbedingungen und die Eigenschaften der Anlagentechnik betreffen. Die so ermittelten Energieaufwendungen werden als Energiebedarf ausgewiesen, wodurch ersichtlich werden soll, dass es sich nicht um gemessene Daten handelt.

Untersuchungen z. B. zum Heizwärmeverbrauch bzw. -bedarf von Wohngebäuden haben gezeigt, dass sich teils erhebliche Differenzen zwischen Verbrauch und Bedarf ergeben (Oschatz, B. 2009, Bigalke, U. *et al.* 2012). Im Durchschnitt liegt der berechnete Bedarf an Energie etwa 30 % über dem gemessenen Energieverbrauch. Dabei zeigt sich, dass die Unterschiede zwischen Verbrauch und Bedarf am höchsten bei unsanierten Altbauten sind. Bei Gebäuden jüngerer Datums sowie umfassend sanierten Altbauten verringern sich diese. Ein anderer Fall ist z. B. der Stromverbrauch privater Haushalte. Eine Vielzahl an Untersuchungen hat sich mit dem Stromkonsum privater Haushalte auseinandergesetzt. Zielstellung hierbei ist häufig die Identifizierung von Einflussfaktoren sowie die Erarbeitung von mathematischen Berechnungsansätzen zur Vorhersage des Stromkonsums einzelner Haushalte oder ganzer Untersuchungsregionen. Aus einigen dieser Untersuchungen geht aus der Gegenüberstellung der gemessenen und berechneten Stromverbräuche hervor, dass auch hier zwischen berechnetem und gemessenem Energie-

konsum teils erhebliche Unterschiede vorliegen können (Ramírez-Mendiola, J. L. *et al.* 2017).

Je kleiner die Bezugsebene ist, beispielsweise ein einzelnes Gebäude oder ein einzelner Haushalt, desto größer können die Unterschiede zwischen Verbrauch und Bedarf sein, da das Nutzer/innenverhalten und die Komfortansprüche wesentlich stärker zum Tragen kommen. Wird die Bezugseinheit, auf die man sich bezieht, jedoch größer, gleichen sich Bedarfskennwerte und Verbrauchskennwerte i. d. R. einander an. Anhand der zuvor dargelegten Beispiele konnte gezeigt werden, dass die Berechnung des Energiebedarfs teils erheblich von dem tatsächlichen Energieverbrauch abweichen kann. Entscheidend sind hierbei die zur Verfügung stehenden Daten zum Untersuchungsraum und die zur Anwendung kommenden Berechnungsansätze.

Für die hier vorliegende Arbeit wird aufgrund der Aspekte Datenverfügbarkeit und Übertragbarkeit für die Bereiche Raumwärme, Warmwasser und Strom ausschließlich der Energiebedarf ausgewiesen. Die zur Berechnung des Energiebedarfs angewendeten Berechnungsansätze und die zugrunde liegenden Daten werden in den jeweiligen Abschnitten dargelegt.

2.3 Lastgang der Energienachfrage und Volatilität regenerativer Energien

Die zunehmende Integration regenerativer Energien in die Energieversorgung, hin zu einer nachhaltigen und umweltfreundlichen Energieversorgung, erfordert eine Transformation des bestehenden Energiesystems. Ein erster Schritt hierbei ist die Ermittlung regenerativer Energiepotenziale. Neben Fragen zur Flächenverfügbarkeit und technologischen Umsetzung kommt der zeitlichen Verfügbarkeit regenerativer Energien sowie der zeitlichen Dynamik des Energieverbrauchs ein zentrales Augenmerk zu (Tjaden, T. *et al.* 2015, Pflugradt, N. D. 2016).

So unterliegen regenerative Energien, abgesehen von der energetischen Nutzung von Biomasse, witterungsbedingten sowie jahres- und tageszeitlichen Schwankungen, wodurch diese nicht in gleicherweise wie fossile Energieträger zur Verfügung stehen. Demgegenüber steht der zeitabhängige Energieverbrauch, der u. a. durch das Nutzer/innenverhalten, Nutzungsrhythmen, sozioökonomische, tages- und jahreszeitliche Rahmenbedingungen sowie durch Witterungsverhältnisse beeinflusst wird. Erst durch die Gegenüberstellung von Angebot und Nachfrage wird ersichtlich zu welchen Anteilen der Energiebedarf durch regenerative Energien gedeckt werden kann.

Ein solcher zeitlicher Verlauf des Energieverbrauchs wird auch als Lastgang bzw. Lastprofil bezeichnet und beschreibt die in der Vergangenheit gemessenen Leistungsbezüge je Zeitintervall und Abnahmestelle. Als Zeitintervall wird der Zeitraum zwischen zwei Messungen verstanden. Dies kann, rein theoretisch, ein beliebig langer Zeitraum sein. In

der Praxis verbreitet sind jedoch mehrheitlich Messzeiträume im 1-, 15- oder 60-Minuten-Takt. Eine Abnahmestelle kann hierbei ein einzelnes Haushaltsgerät, eine Produktionsanlage, eine Wohnung, ein Haus oder gar eine komplette Wohnsiedlung sein (Fischer, D. *et al.* 2015). Je detaillierter die zeitliche Auflösung von Energieverbrauch und Energieangebot ist umso besser können die Potenziale abgeschätzt werden. Stark aggregierte Betrachtungen, auf Jahres- oder Quartalsebene vermitteln zwar einen ersten Eindruck möglicher regenerativer Energiepotenziale, bieten darüber hinaus jedoch wenig Aufschluss über die „Eigen“-Versorgungspotenziale (Tjaden, T. *et al.* 2015). Bereits ein Vergleich zwischen Lastprofilen mit einer zeitlichen Auflösung von einem Tag und 60 Minuten ergibt einen Unterschied von rund 150 % bei der Eigenverbrauchsrechnung. D. h., dass der potenzielle Beitrag regenerativer Energien zur Deckung des Energiebedarfs um das 2,5-fache überschätzt wird. Die Differenz zwischen einer zeitlichen Auflösung von 60 Minuten und einer Minute verringert sich demgegenüber auf 25 % (Pflugradt, N. & Muntwyler, U. 2017). Darüber hinaus werden Lastprofile z. B. auch für die Dimensionierung von Batteriespeichern und zur Erfassung von zeitlich verlagerbaren Lasten (z. B. Waschvorgänge) in sonnen- und/oder windreiche Phasen benötigt.

Entsprechende Lastprofile sind jedoch häufig nicht verfügbar oder fehlen ganz. Um dennoch Analysen zum zeitlichen Verbrauch durchzuführen, kommen verschiedene Verfahren zur Modellierung von Lastgängen zur Anwendung. Diese können in Top-down- und Bottom-up-Ansätze unterteilt werden (Swan, L. G. & Ugursal, V. I. 2009).

Top-down-Ansätze beruhen i. d. R. auf bestehenden Messungen zu Energieverbräuchen mit hohem Aggregationsgrad, die mit Hilfe mathematischer Methoden, hinsichtlich Einflussfaktoren und Wechselwirkungen, analysiert werden. Top-down-Ansätze besitzen einen geringen Detaillierungsgrad, wodurch auch der Datenaufwand gering ist. Dies hat jedoch den Nachteil, dass Top-down-Ansätze mit erhöhten Unsicherheiten behaftet sind und nur wenig Aufschluss zum Einfluss einzelner Phänomene liefern können. Darüber hinaus können die erfassten und abgeleiteten Lastprofile nachträglich nicht mehr in einzelne Teilprofile, beispielsweise für Haushaltsgeräte oder Personengruppen, aufgeteilt und daher nicht an sich geänderte Rahmenbedingungen bzw. Bezugsräume angepasst werden. Top-down-Ansätze verwenden i. d. R. eine zeitliche Auflösung von einer Stunde. Vertreter des Top-down-Ansatzes sind z. B. die Standardlastprofile des VDEW für die Stromnachfrage (Meier, H. *et al.* 1999) oder die Standardlastprofile für die Gasversorgung (Hellwig, M. 2003).

Bottom-up-Ansätze hingegen verwenden je nach Fragestellung u. a. spezifische Informationen zu raumbezogenen sozioökonomischen und demografischen Merkmalen, Daten zur Ausstattung mit Haushaltsgeräten, Gebäudemerkmale sowie Informationen zum Nutzer/innenverhalten. Zur Erstellung zeitlicher Abläufe und Verbrauchsmuster werden u. a. auch empirische Daten z. B. gemessene Energieverbräuche einzelner Geräte oder Aktivi-

tätsprotokolle, in denen die Bewohner/innen Zeitpunkt und Dauer ihrer Aktivitäten erfassen, verwendet (Widén, J. *et al.* 2009, Fischer, D. *et al.* 2016). Mit Hilfe stochastischer Verfahren und Wahrscheinlichkeitskurven erfolgt die Modellierung von Verbrauchsprofilen. Um die Komplexität von Bottom-up-Modellen zu reduzieren und die Arbeit mit entsprechenden Modellen zu handhaben werden aus der Vielzahl der Informationen charakteristische Verbrauchsmuster zusammengefasst. Problematisch an Bottom-up-Modellen ist der hohe Datenaufwand. Die zeitliche Auflösung der Verbrauchsmuster in Bottom-up-Modellen ist u. a. abhängig von den erhobenen Daten und bewegt sich i. d. R. zwischen 1-Minuten-, 15-Minuten- oder 60-Minuten-Intervallen (Knight, I. & Ribberink, H. 2007, VDI 4655, Widén, J. *et al.* 2009, Ampatzi, E. & Knight, I. 2012, Fischer, D. *et al.* 2015, Fischer, D. *et al.* 2016, Pflugradt, N. & Muntwyler, U. 2017).

2.4 Wirkungszusammenhänge zwischen Siedlungsstruktur und Energie

Der Energieverbrauch und das regenerative Energieangebot städtischer und ländlicher Siedlungen werden durch eine Vielzahl an Faktoren beeinflusst. Neben typischen Faktoren, wie z. B. die Effizienz von Energieerzeugungsanlagen, energetische Effizienz von Gebäuden und Ausstattung mit elektrischen Geräten, usw. kommt der Struktur, Morphologie und baulichen Dichte von Siedlungen ebenfalls eine zentrale Bedeutung zu (Doherty, M. *et al.* 2009). So beeinflusst die bauliche Dichte das Angebot nutzbarer Dach- und Grünflächen. Auf der anderen Seite trägt eine höhere Kompaktheit des Bauwerksbestandes auch zu einer höheren energetischen Effizienz bzw. zu einem geringeren Energieverbrauch im Vergleich zu gering verdichteten Strukturen bei (Rode, P. *et al.* 2014). Grund hierfür sind z. B. das bessere Wand-zu-Volumen-Verhältnis von Gebäuden oder auch der verringerte Kühlbedarf im Sommer durch Verschattung.

Aus dem zuvor dargelegten Beispiel wird aber auch ersichtlich, dass einzelne Faktoren in unterschiedlichem Maße sowohl den Energiebedarf als auch das regenerative Energieangebot beeinflussen. Zur Berücksichtigung der Zusammenhänge von Morphologie, Energiebedarf und regenerativem Energieangebot innerhalb einer Siedlung, können sogenannte Struktur- bzw. Bebauungstypen herangezogen werden (ECOFYS 2004, Rode, P. *et al.* 2014). Hierbei handelt es sich um Bebauungsstrukturen die anhand mehrerer baulich-räumlicher Merkmale beschrieben und hierdurch von anderen Bebauungsstrukturen abgegrenzt werden können (Blum, A. & Gruhler, K. 2010), so z. B. freistehende Einfamilienhausbebauung und verdichtete Mehrfamilienhausbebauung in Zeilenbauweise. Anhand dessen kann der Einfluss einzelner Faktoren auf Energiebedarf und/oder Energieangebot für die Bebauungsstrukturen bestimmt werden.

Auf die zuvor angeführten Aspekte der Bebauungsstruktur und deren Einfluss auf den Energiebedarf und das regenerative Energieangebot wird in den nachfolgenden Ab-

schnitten im Detail eingegangen. Ziel ist es zentrale Einflussfaktoren zu identifizieren und nach Möglichkeit (Datenverfügbarkeit, Arbeitsumfang) in die Arbeit einfließen zu lassen.

2.4.1 Struktur und Morphologie von Siedlungen

Jede Siedlung setzt sich aus einer Vielzahl von Elementen zusammen. Zu den sogenannten „Urelementen“ gehören die Linie (z. B. Straße), die Fläche (z. B. Grünfläche) und der (Bau-)Körper (z. B. Gebäude). Durch ihre Anordnung, Häufigkeit und Beziehungen untereinander verleihen die Elemente der Siedlung eine räumliche Struktur und Form (Morphologie), auf Grundlage derer die Siedlung beschrieben werden kann (Blum, A. & Gruhler, K. 2010, Rode, P. *et al.* 2014). Anhand der hinterlegten Informationen zur Morphologie können grundlegende Untersuchungen auf der Ebene ganzer Siedlungen (Makroebene) für unterschiedliche Forschungsfragen durchgeführt werden. Sie bieten jedoch wenige Informationen, wenn es um Fragen des Energieverbrauchs und regenerativer Energiepotenziale geht. Je stärker die Informationen aggregiert sind, desto ungenauer auch die Ergebnisse entsprechender Untersuchungen. Um detailliertere Untersuchungen zu ermöglichen wird ein höherer Detaillierungsgrad benötigt. Entscheidend für die Wahl des Detaillierungsgrades ist i. d. R. die Forschungsfrage, die im Rahmen der Untersuchung beantwortet werden soll (Blum, A. & Gruhler, K. 2010).

Um beispielsweise Fragen bezüglich des Energieverbrauchs von Wohngebäuden und der Bewohnerschaft darin zu untersuchen bedarf es z. B. Informationen zur Gebäudephysik und zur Bewohnerschaft. Dem Detaillierungsgrad sind hierbei lediglich durch die Verfügbarkeit an Daten Grenzen gesetzt. Ein zu hoher Detaillierungsgrad (z. B. einer ganzen Stadt) kann jedoch zu einem erheblichen Bearbeitungsaufwand führen, der möglicherweise nicht im Verhältnis zu dem erzielten Erkenntnisgewinn steht. Ein solches Beispiel ist die Berechnung des Energieverbrauchs eines Gebäudes mittels eines komplexen physikalischen Modells unter Berücksichtigung der Eigenschaften der Baumaterialien, der Aktivitäten der Bewohner/innen und der mikro-klimatischen Eigenschaften der unmittelbaren Umgebung um das Gebäude. Während sich Berechnungen für ein einzelnes Gebäude (Mikroebene) noch in akzeptablen Zeiträumen und mit vertretbarem Aufwand durchführen lassen, kann eine Analyse einer ganzen Siedlung über ein vertretbares Maß an Rechenaufwand und Bearbeitungszeit hinausgehen. Hinzu kommt, dass die Berechnungsmodelle und Simulationen die über die Betrachtung eines einzelnen Gebäudes hinausgehen, weitere Aspekte berücksichtigen müssen (Quan, S. J. 2016). So z. B. die gegenseitige Beeinflussung, durch Verschattung benachbarter Gebäude. Ein weiterer Aspekt ist die Datenverfügbarkeit. Während beispielsweise eine große Sammlung an Daten für ein spezifisches Gebäude zur Verfügung steht, sind vergleichbare Daten für eine ganze Siedlung nicht in gleichem Detaillierungsgrad nur selten verfügbar. Infolgedessen müssen i. d. R. Vereinfachungen vorgenommen werden.

Der zuvor geschilderte Umstand trifft auch auf Fragen bezüglich des regenerativen Energiepotenzials innerhalb von Siedlungen zu. So kommen zu den Rahmenbedingungen einer Untersuchung eines einzelnen Gebäudes und z. B. dessen solarenergetischen Potenzials zusätzlich noch Einflussfaktoren (z. B. Verschattung) durch die nähere Umgebung und Bebauung hinzu. Insbesondere die Gebäude und Bauwerke umgebenden Flächen nehmen für die Bereitstellung regenerativer Energien eine hohe Bedeutung ein, stellen diese doch potenzielle Energieertragsflächen für regenerative Energien innerhalb der Siedlungen dar.

Aus den vorausgehenden Ausführungen geht dahingehend hervor, dass die Umgebung, deren Gestalt, Struktur und Ausdehnung Einfluss auf den Energieverbrauch und das regenerative Energiepotenzial ausüben (vgl. Kapitel 3.4.2 und 3.4.3). Fragestellungen, die den Energieverbrauch und das regenerative Energiepotenzial innerhalb einer Siedlung adressieren, sollten dahingehend diese Aspekte berücksichtigen. Weiterhin wird ersichtlich, dass eine Untersuchung, auf der Ebene einer ganzen Siedlung, einen geringeren Detaillierungsgrad bereithält bzw. sehr rechen-, zeit- und arbeitsintensiv sein kann. Bei einer Untersuchung ausgehend von einzelnen Gebäuden, bleiben hingegen möglicherweise relevante morphologische und strukturelle Aspekte bei der Analyse der regenerativen Energiepotenziale und Energieverbräuche unberücksichtigt.

Ausgehend von diesen Überlegungen wurden seit Ende der 1980er Jahre zunehmend Untersuchungen auf einer mittelmaßstäblichen bzw. teilstädtischen Betrachtungsebene (Mesoebene) durchgeführt. Zunächst noch vereinzelt, hat die Analyse auf Mesoebene seit der Jahrtausendwende an Bedeutung gewonnen. Ausschlaggebend hierfür waren u. a. die zunehmende Leistungsfähigkeit von rechnergestützten Analysen, neue methodische Ansätze und Verfahren sowie neue Fragestellungen im Kontext der Stadtentwicklung. Hierbei unterliegt die Bezeichnung Mesoebene keiner einheitlichen Definition, sondern bezeichnet vielmehr mehrere Betrachtungsebenen zwischen der siedlungsraumbezogenen Mikro- und Makroebene. Dies kann Untersuchungen auf der Ebene von Stadtteilen, Quartieren und Baublöcken umfassen. Zur Abgrenzung der genannten Teilräume werden u. a. administrative Einteilungskriterien (z. B. Postleitzahl) oder andere Abgrenzungsmethoden, wie z. B. die Abgrenzung von Baublöcken durch die umgebenden Straßen (daher wird z. B. auch der Begriff Straßengeviert verwendet), verwendet. Der Begriff Quartier wiederum ist nicht eindeutig abgegrenzt und wird im alltäglichen Sprachgebrauch wie auch in der Wissenschaft sowohl für Stadtteile als auch für Baublöcke synonym verwendet (Schnur, O. 2014).

Die Wahl der Maßstabsebene richtet sich nach der Frage- bzw. Zielstellung sowie nach den zur Verfügung stehenden Daten. Dahingehend wurde in den letzten Jahren vermehrt der Baublock bzw. das Straßengeviert als Forschungsgegenstand adressiert und als Hilfsmittel für Forschungsfragen im gesamtstädtischen Kontext herangezogen (Westphal, C. 2008, Blum, A. & Gruhler, K. 2010). In diesem Forschungskontext entstanden in den

letzten 20 bis 30 Jahren eine Vielzahl an Typologien zur Einteilung und Beschreibung des Siedlungsraums auf der Ebene des Baublocks. Verbreitet sind diese Typologien unter den Bezeichnungen Strukturtypen, Siedlungstypen und Bebauungstypen. Ziel der Typisierung ist es, homogene Strukturen zu identifizieren und hierdurch die Vielfalt der Baublöcke auf ein handhabbareres Maß (Anzahl) an Typen zu reduzieren, die sich auch vergleichsweise einfach auf andere Untersuchungsräume übertragen lassen. Je nach Forschungsfrage werden bei der Erstellung der Typen spezifische Merkmale zugrunde gelegt. Zur Typisierung werden in der Forschung zwei Ansätze verwendet. Hierbei handelt es sich um den „empirischen“ und „idealtypischen“ Ansatz. Beim empirischen Ansatz werden mittels statistischer Verfahren empirische Daten erhoben, anhand derer, Aussagen über den Untersuchungsgegenstand getroffen werden können. Demgegenüber wird beim idealtypischen Ansatz der Untersuchungsgegenstand auf Basis theoretisch-konzeptioneller Überlegungen konstruiert. Während beim empirischen Ansatz ein möglichst direkter Bezug zur Wirklichkeit hergestellt wird, beschreibt der idealtypische Ansatz ein theoriegeleitetes Abbild der Wirklichkeit, das in dieser idealisierten Form in der Wirklichkeit i. d. R. nicht vorkommt. In der Forschungspraxis kommt es mehrheitlich zu einer Kombination beider Ansätze, wobei die Gewichtung der Ansätze variieren kann (Blum, A. & Gruhler, K. 2010).

Der Einsatz von Strukturtypen, insbesondere im Bereich der energetischen Stadtentwicklung und Stadtplanung, hat im Zuge der Energiewende und der daraus resultierenden Transformation der Städte in den letzten Jahren vermehrt an Bedeutung gewonnen. Untersuchungen mit Strukturtypen zeichnen sich besonders durch die Möglichkeit aus, interdisziplinäre Fragestellungen und damit einhergehende Wechselwirkungen, Einflussfaktoren und Raumbezüge von Energieverbrauch und Energieangebot von Siedlungen zu adressieren. Ihre Eignung, entsprechende Fragestellungen adäquat zu behandeln, wird durch eine Vielzahl an Studien belegt. Diese reichen von anfänglich durch Energieeinsparung getriebene Forschungsfragen wie bei Roth, U. *et al.* (1984), zu Fragen der Fernwärmeversorgung (Blesl, M. 2002) und der Potenziale regenerativer Energien (Everding, D. & Kloos, M. 2007, Genske, D. D. *et al.* 2009, Wurzbacher, S. 2016) bis hin zu umfassenden Untersuchungen zum Städtebau mit Passivhäusern (Vallentin, R. 2011), gesamtstädtischen Energiekonzepten und städtischen Planungstools (Internationale Bauausstellung IBA Hamburg (Hrsg.) 2010, Koziol, M. *et al.* 2011, Hegger, M. *et al.* 2012).

Wie aus den zuvor genannten Beispielen hervorgeht, bietet der Strukturtypenansatz die Möglichkeit die zuvor aufgeworfenen Forschungsfragen bezüglich des Potenzials regenerativer Energien innerhalb von Siedlungen zur Energieversorgung der Wohnbebauung auf einer Betrachtungsebenen zu bearbeiten, die zum einen aggregiert genug ist, um Analysen für eine vollständige Siedlung vorzunehmen und andererseits aber auch eine differenzierte Untersuchung erlaubt.

2.4.2 Siedlungsstrukturen im Kontext von Energieverbrauch und Energieeffizienz

In einer Vielzahl an Untersuchungen (vgl. Doherty, M. *et al.* 2009, Papa, R. *et al.* 2014, Gargiulo, C. & Russo, L. 2017) wird der Zusammenhang von Energieverbrauch, Energieeffizienz von Städten und der Morphologie bzw. Struktur einer Siedlung beleuchtet. Ziel ist es, Erkenntnisse über das Zusammenwirken von Energieverbrauch und Bevölkerungsdichte, baulicher Dichte, Landnutzung, Morphologie und Struktur von Städten zu gewinnen, um hieraus Schlüsse für die weitere Planung und Entwicklung von Städten und Stadtteilen hin zu einer höheren Nachhaltigkeit abzuleiten. Hierbei wurden und werden mehrheitlich Fragen bezüglich des Energieverbrauchs für Mobilität sowie für Beleuchtung, Beheizung und Klimatisierung von Gebäuden adressiert (Doherty, M. *et al.* 2009, Papa, R. *et al.* 2014). Auf den Bereich Mobilität soll nicht weiter eingegangen werden, da er nicht Gegenstand der vorliegenden Arbeit ist. Es kann jedoch angemerkt werden, dass der Energieverbrauch für die tägliche Mobilität der Bewohner/innen nur indirekt durch die bauliche Dichte beeinflusst wird. Hierbei spielen insbesondere Aspekte wie Ausdehnung und Gestalt (Morphologie) der Siedlung, das Angebot an Verkehrssystemen, die Lage von Quartieren (Zentrum oder Randlage), die Nähe und das Angebot von Versorgungseinrichtungen, Geschäften und Arbeitsplätzen eine zentrale Rolle.

Demgegenüber verweist eine Vielzahl an Studien auf den unmittelbaren Einfluss der Morphologie, Struktur und baulichen Dichte von baulichen Strukturen auf den Energieverbrauch von Strom und Wärme in Gebäuden. Untersuchungen u. a. von Deilmann, C. *et al.* (2017) und Steadman, P. *et al.* (2013) verweisen auf den Einfluss der baulichen Dichte und der Gebäudegeometrie auf den Energieverbrauch für Beleuchtung. So führt eine höhere bauliche Dichte zu einer potenziell höheren Verschattung und damit zu einem Mehrbedarf an künstlicher Beleuchtung. Ein weiterer Aspekt ist z. B. der Effekt von Wärme-Inseln bzw. der Wärmespeicherung in der Bausubstanz. Dieser Effekt nimmt mit steigender baulicher Dichte zu, da der größere Bauwerksbestand mehr Energie speichern kann, die Wärme in geringerem Umfang durch Winde abtransportiert werden kann und verdichtete Strukturen selbst erhebliche Mengen an Wärme produzieren (Verkehr, Abwärme technischer Anlagen, usw.) sowie kühlende Effekte durch vergleichsweise wenige Grünflächen und Vegetation fehlen (Quan, S. J. 2016). Infolgedessen steigt z. B. der Energiebedarf für Klimatisierung.

Während die Klimatisierung im deutschen Wohnungsbestand derzeit kaum eine Rolle spielt, wird ein erheblicher Anteil des Energieverbrauchs für Wohngebäude für die Beheizung aufgewendet und hat infolgedessen eine zentrale Bedeutung für die energetische Transformation der Städte. Der Heizenergiebedarf von Wohngebäuden wird durch mehrere Faktoren beeinflusst (Ratti, C. *et al.* 2005, Quan, S. J. 2016). Hierzu zählen die energetische Eigenschaft der Bausubstanz des Gebäudes (U-Wert von Bauteilen, H_T :

Transmissionswärmekoeffizient), der Nutzungsgrad der Anlagentechnik (Wärmeerzeuger, Verteilung), das Nutzer/innenverhalten der Bewohnerschaft (z. B. Aufenthaltsdauer, Lüftungsverhalten, Raumtemperatur) und die Hüllfläche des Gebäudes über die Wärme an die Umgebung abgegeben wird (A/V-Verhältnis). Während die energetischen Eigenschaften der Bausubstanz, der Nutzungsgrad der Anlagentechnik und das Nutzer/innenverhalten der Bewohnerschaft unabhängig von der Bauweise sind kann das Verhältnis von Hüllfläche zu Volumen erheblich durch die Bauweise beeinflusst werden. D. h., dass Gebäude, die in einem Verbund mit anderen Gebäuden stehen, z. B. in Form von Reihenhaus- oder Zeilenbebauung, ein besseres A/V-Verhältnis aufweisen als das gleiche Gebäude in freistehender Bauweise. Dies wiederum hat Einfluss auf den Heizenergiebedarf (Lintner, S. *et al.* 2010). Hinzu kommt, dass der Standort eines Gebäudes und dessen Umgebung Einfluss auf den Heizenergiebedarf nimmt, so z. B. durch den zuvor genannten Effekt der Wärme-Insel. Gebäude in einer exponierten Lage (freistehend und ohne Gebäude in näherer Umgebung) sind beispielsweise in höherem Maße den Witterungsbedingungen ausgesetzt als Gebäude innerhalb einer verdichteten Bebauung. Ratti, C. *et al.* (2005), Steadman, P. *et al.* (2013) und Rode, P. *et al.* (2014) untersuchten in diesem Kontext den Einfluss von Gebäudegeometrie (Höhe, Tiefe, A/V-Verhältnis) und baulicher Dichte auf den Energieverbrauch der Bebauung. In beiden Untersuchungen konnte gezeigt werden, dass mit steigender baulicher Dichte der Energieverbrauch sinkt. Die infolge steigender baulicher Dichte zunehmende Verschattung und damit sinkender natürlicher Beleuchtung sowie passiver solare Wärmegewinne führt laut Steemers, K. (2003) zu einem steigenden Energiebedarf. Im Gegenzug führt die höhere bauliche Dichte aufgrund reduzierter Außenflächen zu Energieeinsparungen. Je nach Rahmenbedingungen und Situation können sich beide Effekte gegenseitig aufwiegen.

Insgesamt zeigt sich in den zugrunde liegenden Untersuchungen, dass die Geometrie und Kompaktheit (A/V-Verhältnis) eines Gebäudes und dessen Anordnung in der Bebauung sowie die bauliche Dichte der Bebauung Einfluss auf den Heizwärmebedarf nehmen. Durch die höhere Kompaktheit (günstigeres Verhältnis von Hüllfläche zu Gebäudevolumen), die i. d. R. mit der baulichen Dichte (Geschossflächendichte) steigt, sinkt tendenziell der Heizenergiebedarf. Untersuchungen von Tereci, A. *et al.* (2010), Danielski, I. *et al.* (2012), Quan, S. J. (2016) und Evans, S. *et al.* (2018) führen Energieeinsparungen von 10 % bis 25 % an, die infolge der verbesserten Kompaktheit bzw. Dichte erzielt werden können.

2.4.3 Siedlungsstrukturen und Energiebereitstellung

Die Erschließung und Bereitstellung regenerativer Energien in Siedlungen unterliegt vielfältigen Rahmenbedingungen und Restriktionen. Je nach regenerativer Energieform wirken sich die Rahmenbedingungen und Gegebenheiten vor Ort in unterschiedlichem Maße auf das Angebot und die Bereitstellung aus. So ist die Bereitstellung von Solarstrom

und Solarwärme auf die solare Strahlungsenergie und Flächen, auf denen diese mehr oder weniger ungehindert genutzt werden kann, angewiesen. Windenergie wiederum ist auf Windströme und möglichst hohe Windgeschwindigkeiten angewiesen. Auch für die Energieerzeugung aus organischen Stoffen werden zumindest teilweise geeignete Freiflächen zur Bewirtschaftung benötigt. Diese Punkte verdeutlichen, dass für die Integration regenerativer Energien innerhalb von Siedlungen neben der generellen Verfügbarkeit der einzelnen Energieformen insbesondere die Verfügbarkeit geeigneter Flächen in ausreichender Größenordnung von Bedeutung ist. Hierbei spielen u. a. die Bebauung, deren Höhe, Stellung, bauliche Dichte, die Flächennutzung, Anordnung und deren Größe eine wichtige Rolle. Untersuchungen von Vettorato, D. (2011), Hamilton, I. G. *et al.* (2010) und Quan, S. J. (2016) weisen darauf hin, dass unterschiedliche Siedlungsstrukturen in unterschiedlichem Maße Einfluss auf das Angebot regenerativer Energien nehmen. Hieraus leitet sich die Frage ab, welche Merkmale besonderen Einfluss auf das Angebot regenerativer Energien haben. Hierzu wird nachfolgend auf die regenerativen Energieformen Solarenergie und Biomasse und deren Wechselwirkungen mit der Bebauung eingegangen.

Solarenergie

Die Nutzung solarer Strahlungsenergie zur Bereitstellung thermischer und elektrischer Energie durch Solarthermie- (ST) und Photovoltaikanlagen (PV) ist in Siedlungen bzw. auf Bauwerken weit verbreitet. So bieten die nutzbaren Dachflächen sehr gute Ausgangspositionen für die Installation von PV und ST, da anders als Freiflächen Dachflächen lediglich einer geringen Nutzungskonkurrenz unterliegen. Durch die Installation direkt beim Verbraucher ist zudem eine direkte Abnahme/Verwendung der erzeugten elektrischen und thermischen Energie möglich. Im Fall der Solarthermie ist dies u. a. eine zentrale Voraussetzung für eine wirtschaftliche Nutzung, da ein Transport über mittlere und lange Distanzen mit erheblichen Verlusten verbunden ist.

Die Nutzung solarer Strahlung zur Bereitstellung thermischer und elektrischer Energie unterliegt jedoch einer Vielzahl an ertragsmindernden Einflüssen. Hierzu gehört insbesondere die Verschattung von PV und ST, z. B. durch Gebäude, Dachaufbauten und Vegetation (vorrangig Bäume). Durch die Verschattung kann beispielsweise die Stromproduktion fast vollständig erliegen bzw. sehr stark gemindert werden. Gleiches gilt auch für Solarthermie. Hierbei zeigt sich, dass die Gefahr bzw. die Fläche der Verschattung tendenziell mit der baulichen Dichte der Bebauung zunimmt (Sarralde, J. J. *et al.* 2015, Mohajeri, N. *et al.* 2016, Morganti, M. *et al.* 2017, Moraitis, P. *et al.* 2018).

Weitere Parameter, die den Ertrag von PV- und ST-Anlagen beeinflussen sind die Ausrichtung, Neigung und das Angebot solarenergetisch nutzbarer Flächen (Dächer und Fassaden). Ausrichtung, Neigung und Angebot werden maßgeblich durch die baulichen Gegebenheiten vor Ort bestimmt. Hierbei spielen jedoch auch wirtschaftliche Überlegun-

gen eine Rolle. So wird versucht vorrangig Flächen zu nutzen, die möglichst frei von einer Verschattung sind und eine, der Region entsprechend optimale Ausrichtung und Neigung besitzen (für Deutschland z. B. Süd-Ost, Süd und Süd-West). Insgesamt können zwei gegenläufige Zusammenhänge aus den zuvor genannten Beobachtungen identifiziert werden. So geht eine hohe bauliche Dichte i. d. R. mit einer steigenden Dachfläche einher und bietet somit ein erhebliches Potenzial zur Nutzung solarer Strahlung. Demgegenüber zeigen Untersuchungen u. a. von Mohajeri, N. *et al.* (2016) und Moraitis, P. *et al.* (2018), dass mit steigender baulicher Dichte der solare Ertrag als auch die potenziell nutzbare Fläche durch vielfältige Effekte (Verschattung, Aufbauten, Dachausrichtung) gemindert wird. Für die Analyse des solarenergetischen Potenzials in Siedlungen gilt es dahingehend die Faktoren bauliche Dichte, Dachausrichtung, Dachneigung und Dachaufbauten zu berücksichtigen.

Energie aus Biomasse

Biomasse kommt in Siedlungen in verschiedenen Formen vor. Hierzu gehören die über das Abwasser entsorgten organischen Bestandteile (Ausscheidungen und Abfälle), Biomasse in Form von Vegetation auf öffentlichen und privaten Grünflächen sowie organische Abfälle. Bisher wird die Biomasse über verschiedene Pfade verwertet oder entsorgt, wozu die private (in privaten Gärten), öffentliche und kommerzielle (durch Entsorgungsträger) Kompostierung sowie die Mitverbrennung in Heizkraftwerken gehören. Nur vereinzelt werden die urbanen Biomassen einer gezielten energetischen Verwertung zugeführt. Die Erzeugung von Energie durch Biomasse ist abhängig von der verfügbaren Biomasse aus diesen Reservoirs und deren Energiegehalt. Jedes dieser Vorkommen erfordert für die Erschließung der darin befindlichen energetischen Potenziale unterschiedliche Konzepte und Verfahren. Das Potenzial der unterschiedlichen Biomassefraktionen und Vorkommen wird von mehreren Faktoren beeinflusst. Zentral ist hierbei die Größe der öffentlichen und privaten Grünflächen, die Art der Vegetation sowie die Anzahl der Bewohner/innen. Hierbei bestimmt die Größe der Grünfläche, bei mehr oder weniger gleicher Vegetationsstruktur, das Aufkommen an pflanzlicher Biomasse. Die Vegetationsart hingegen beeinflusst den Energiegehalt und die energetischen Konversionsverfahren. Das Aufkommen von Lebensmittelabfällen und organischer Bestandteile im Abwasser wird maßgeblich durch die Bevölkerungsgröße des Bezugsgebietes beeinflusst.

Übertragen auf die Bebauung und die unterschiedlichen Strukturtypen einer Siedlung werden die Grünflächen durch die Flächennutzung der Siedlung und die bauliche Dichte beeinflusst. Hoch verdichtete Bebauungen weisen i. d. R. nur geringe Grünflächen auf, wohingegen Ein-/Zweifamilienhausbebauungen häufig große Grünflächen in Form privater Gärten besitzen. Hinweise, die aufzeigen, dass die Art der Vegetation durch die Art der Bebauung oder die bauliche Dichte beeinflusst wird, liegen nicht unmittelbar vor. Es kann zwar beobachtet werden, dass insbesondere in Siedlungsgebieten mit Eigenhei-

men, private Gärten mit mehrheitlich üppiger Vegetation vorzufinden sind, dennoch zeigt die vorliegende Literatur, dass die Aufteilung der Vegetationsarten (Rasen- und Beetfläche, Hecken- und Gehölzflächen) weitestgehend gleich bleibt (Arlt, G. *et al.* 2005, Arlt, G. & Lehmann, I. 2005, Meinel, G. & Hecht, R. 2005, Meinel, G. *et al.* 2014). Die aus den Grünflächen hervorgehenden Biomasseaufkommen werden darüber hinaus durch den Umfang und Art der Bewirtschaftung und Pflege (Düngung, Eigenkompostierung, Entsorgung im Restmüll, usw.) beeinflusst.

Das Aufkommen organischer Abfälle, insbesondere in Form von Lebensmittelabfällen, wird durch die Bevölkerungsdichte von Siedlungsstrukturen beeinflusst. Hierbei geht die Bevölkerungsdichte i. d. R. auch mit der baulichen Dichte einher. Ein unmittelbarer Zusammenhang besteht zwischen der baulichen Dichte und der Bevölkerungsdichte nicht, da Aspekte wie Leerstand, Wohnungsdichte, Wohnungsbelegung, usw. die Bevölkerungsdichte beeinflussen.

3 Das Siedlungsmodell

Für die Untersuchung des regenerativen Energiepotenzials innerhalb einer Gemeinde zur Deckung des lokalen Energiebedarfs privater Haushalte werden, wie im Absatz 2.4 aufgezeigt, eine Vielzahl an Informationen benötigt. Dies beinhaltet z. B. Informationen zu Flächen und deren Nutzung (z. B. Wohnfläche, Siedlungsfläche, Verkehrsfläche), zur baulich-physischen Struktur (z. B. Anzahl und Größe von Bauwerken, Anordnung und Stellung von Bauwerken), zur Funktion (Wohnen, Gewerbe, Erholung), Informationen zu soziodemografischen (Bevölkerungszahl, Verteilung) und technischen Merkmalen sowie zu klimatischen Faktoren. Die zuvor genannten Informationen ermöglichen in begrenztem Umfang raumbezogene Untersuchungen zum regenerativen Energiepotenzial sowie zum Energiebedarf einer Gemeinde. Erst durch die Verschneidung der verschiedenen Informationen mit kleinteiligen raumbezogenen Informationen ermöglichen die Modellierung des regenerativen Energiepotenzials und des Energiebedarfs einer Gemeinde. Da jedoch entsprechende Daten unterhalb der Gemeindeebene, z. B. auf der Stadtteil-, Quartiers- und Baublockebene, nur begrenzt verfügbar sind, werden bereits seit den 80er Jahren sogenannte bebauungs- bzw. strukturtypologische Ansätze verwendet (vgl. Abschnitt 2.4.1). Aufgrund ihrer informationsverdichtenden und komplexitätsreduzierenden Eigenschaft (Schiller, G. 2010) eignet sich der Strukturtypenansatz für die Untersuchung komplexer Fragestellungen im städtischen Kontext. Zentrale Merkmale sind hierbei die Bebauungs- und Freiflächenstrukturen (vgl. Absatz 2.4). Wie bereits zuvor dargelegt, zeigen Untersuchungen von Roth, U. *et al.* (1984), Genske, D. D. *et al.* (2009) und Hegger, M. *et al.* (2012), die Eignung des Strukturtypenansatzes für Fragen der Energienachfrage und des Energieangebots im städtischen Kontext. Hieran anknüpfend wird auch in der vorliegenden Arbeit auf den Strukturtypenansatz zurückgegriffen.

Aufgrund unterschiedlicher Fragestellungen, Datenverfügbarkeit und Verfahrensansätzen (top-down oder bottom-up, empirisch oder konstruiert) unterscheiden sich die zugrunde liegenden Typologien u. a. in Anzahl der Typen, deren Charakteristika und Informationsgehalt. Aufbauend hierauf können zwei Arten von Typologien unterschieden werden. Die erste Gruppe umfasst Typologien, die Typen auf der Grundlage empirischer Untersuchungen und Verfahren aus realen Strukturen ableiten (vgl. Hegger, M. & Dettmar, J. 2014). Bei der zweiten Gruppe hingegen, werden Typen mittels festgelegter Regeln konstruiert, wodurch sich eine Vielzahl an Varianten konstruieren lassen. Hierzu gehören z. B. Roth, U. *et al.* (1984), Hamilton, I. G. *et al.* (2010), Vallentin, R. (2011) und Wurzbacher, S. (2016).

In Anbetracht der zugrunde liegenden Fragestellung, der zur Verfügung stehenden Daten und weiteren Überlegungen, wird der konstruktive Verfahrensansatz verwendet. Aufgrund dessen wurde für die vorliegende Arbeit ein Modell, das „Siedlungsmodell“, erarbeitet (vergleiche Abb. 2).

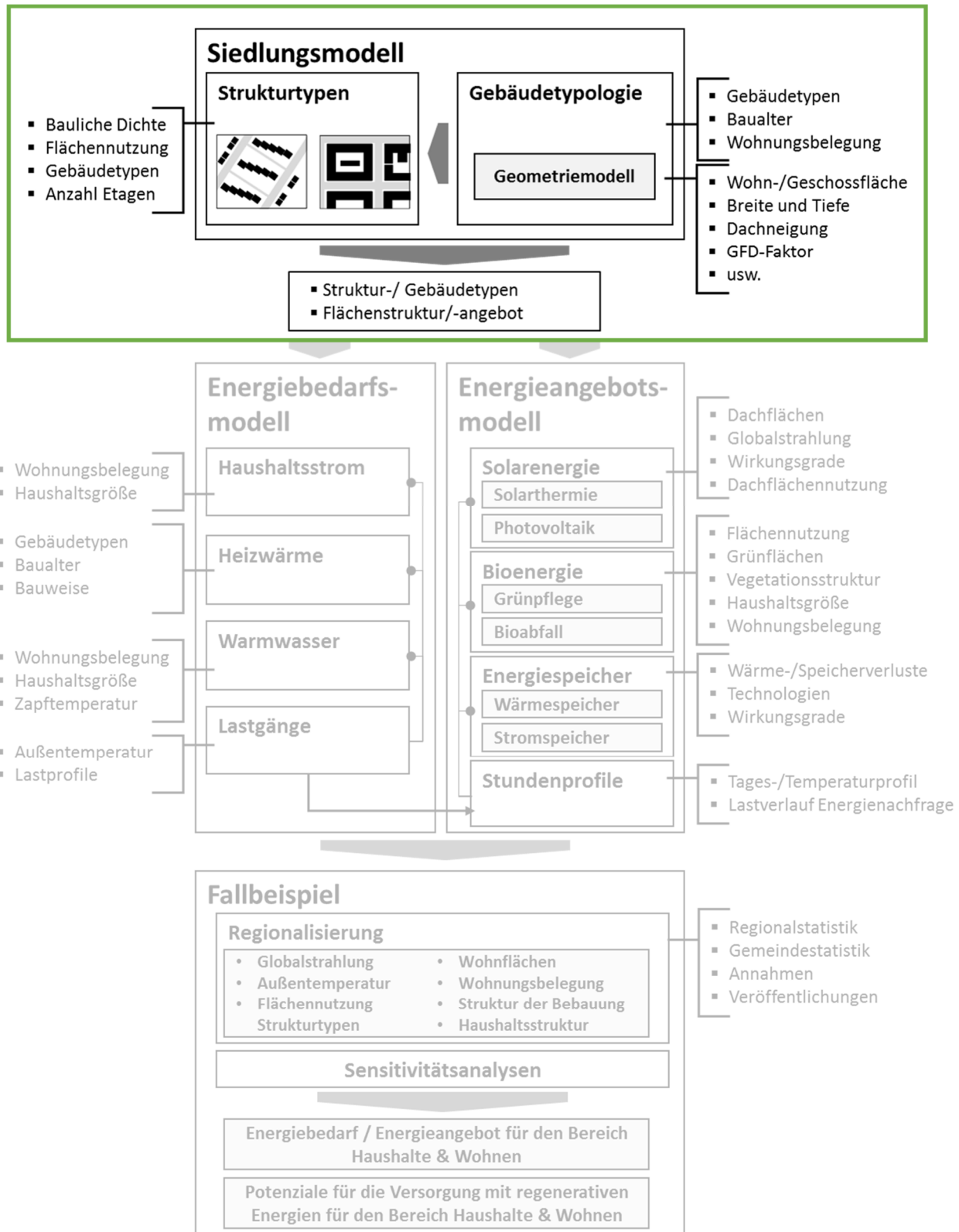


Abb. 2: Modellstruktur – Fokus Siedlungsmodell (Eigene Darstellung)

Das Siedlungsmodell besteht aus dem Strukturtypenansatz und einem Verfahren, mit dessen Hilfe Gebäudevertreter erstellt werden können. Für die Erarbeitung der Strukturtypen konnte auf eine Vielzahl an Typologien aus diversen Untersuchungen zurückgegriffen werden (Blesl, M. 2002, ECOFYS 2004, Siedentop, S. et al. 2006, Koziol, M. et al.

2011, Coenradie, B. & Haag, L. 2012, Hegger, M. & Dettmar, J. 2014). Die Gebäudevertreter wiederum beruhen auf einem eigens hierfür erarbeiteten Geometriemodell. Beiden, Strukturtypen und Gebäudevertreter, liegen spezifische Input-Daten, u. a. Angaben zur Wohnfläche, Geschossigkeit und Geschossflächendichte, zugrunde.

Unterschiede in der Bebauungs- und Freiflächenstruktur sowie unterschiedliche klimatische Verhältnisse beeinflussen den Energieverbrauch und das regenerative Energiepotenzial von Gemeinden. Aufgrund der vielfältigen Anpassungsmöglichkeiten im Siedlungsmodell können entsprechende regionale und gemeindespezifische Unterschiede berücksichtigt werden. Hierzu werden jedoch Informationen zu den jeweiligen Regionen bzw. Gemeinden benötigt. In diesem Zusammenhang wurden die Datenbanken der statistischen Ämter sowie des Statistischen Bundesamts als zentrale Datengrundlage identifiziert. Diese stellen die zentralen Daten zum Gebäude- und Wohnungsbestand sowie zu Bevölkerung und Haushalten auf der nationalen Ebene, Länderebene und Gemeindeebene zur Verfügung. In regelmäßigen Abständen werden hierzu bestehende Statistiken fortgeschrieben sowie neue Daten erhoben (z. B. Zensus).

Weiterhin wurde zur Berücksichtigung klimatischer Unterschiede auf die sogenannten Testreferenzjahre des DWD, die in regionale Zonen unterteilt sind, zurückgegriffen. Flächendeckende Daten, u. a. zur baulichen Dichte, der Flächennutzung, Dachform und Dachneigung, stehen nach Kenntnis des Autors nicht zur Verfügung bzw. existieren derzeit nicht. Entsprechende Daten wurden im Rahmen von Literaturrecherchen sowie eigenen Auswertungen erhoben und in Form allgemeingültiger Annahmen hinterlegt (vgl. Abschnitt 3.1.2). Wechselwirkungen zwischen der Bebauung und dem regenerativen Energiepotenzial, wie in Abschnitt 2.4.3 dargelegt, werden in Form von Berechnungsfaktoren in der Modellierung berücksichtigt.

3.1 Der Strukturtypenansatz

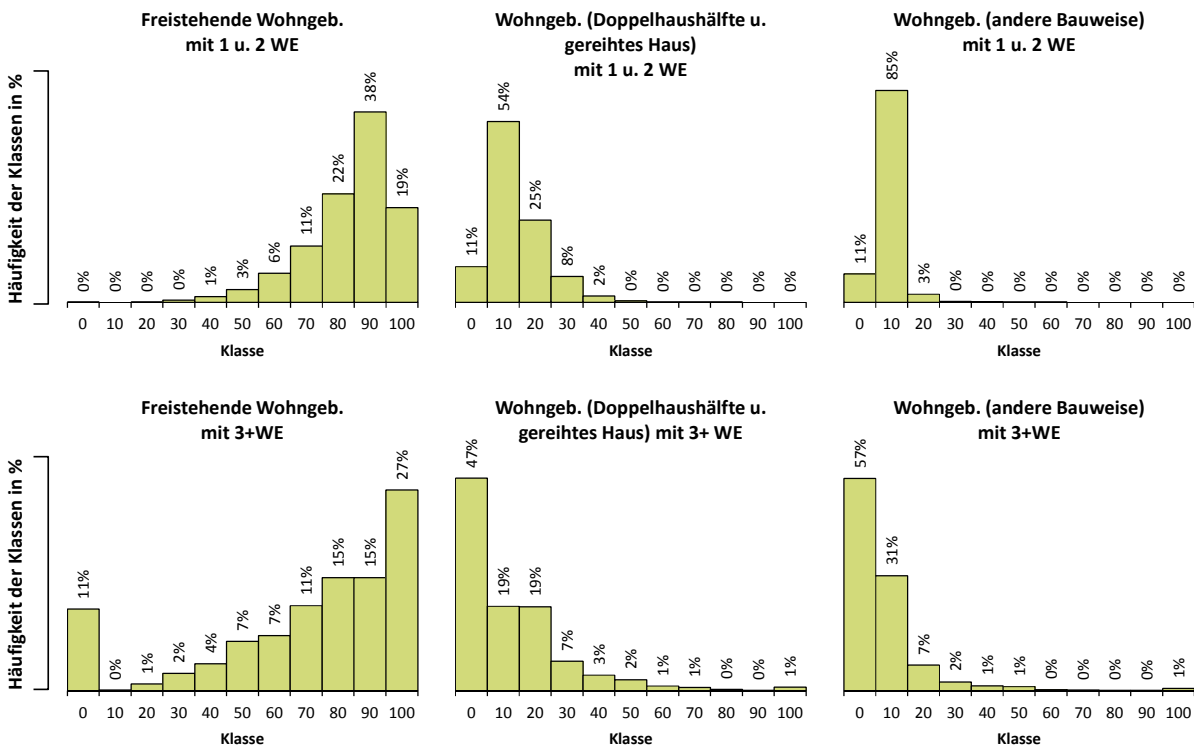
Der in der vorliegenden Arbeit verwendete Strukturtypenansatz verfolgt das Ziel, mittels raumbezogener Daten zu Bauwerken und Freiflächen Informationen für die Bestimmung des Energiebedarfs und des regenerativen Energiepotenzials auf der Blockebene, in Form von Strukturtypen, bereitzustellen. Hierzu wurden zunächst typische Bebauungsformen aus bestehenden Studien recherchiert und ausgewählt. Das Augenmerk lag hierbei auf der Auswahl einer handhabbaren aus möglichst wenigen Typen bestehende Typologie, die dennoch in der Lage ist, die Vielfalt der Bebauungsstruktur einer Gemeinde abzubilden. Die Auswahl einer geringen Anzahl an Typen verringert zudem die Anzahl nachfolgender Berechnungen und das resultierende zu interpretierende Datenaufkommen. Im nachfolgenden Abschnitt 3.1 wird auf die Strukturtypen eingegangen. Im Anschluss daran (Abschnitt 3.2) werden die, für die Untersuchung, als relevant identifizierte Merkmale beschrieben und charakteristische Bandbreiten der Merkmalsausprägungen für die einzelnen Strukturtypen herausgearbeitet.

3.1.1 Die Strukturtypen

Für die Untersuchungen wurden aus bestehenden Typologien die Bandbreite der Bebauungs-, Siedlungs- und Strukturtypen zusammengetragen und nach Bebauungsstrukturen gegliedert. Hierbei hat sich gezeigt, dass die verschiedenen Typen mehrheitlich den Bebauungsstrukturen solitäre, Reihen-/Zeilen-, Block- und Teppichbebauung zugeordnet werden können. Die Bebauungsstrukturen können darüber hinaus den Wohnformen Mehrfamilienhaus-, Eigenheim- und gemischte Bebauung zugeordnet werden. Ausgehend hiervon wurden die in Tab. 2 und Abb. 4 dargelegten sechs Typen als charakteristische Bebauungsformen identifiziert.

In allen Gemeinden anzutreffen sind z. B. freistehende Ein- und Zweifamilienhausbebauungen mit geringer baulicher Dichte. Ihre Bedeutung (Anzahl bzw. Fläche) weist eine hohe Spanne zwischen den Gemeinden auf. In der Mehrheit der Gemeinden macht die Bauweise zwischen 70 % und 100 % des Gebäudebestands aus (Abb. 3).

Ein- und Zweifamilienhäuser in verdichteter Bauweise (Doppel- und Reihenhäuser) sind ebenfalls in der Mehrheit der Gemeinden anzutreffen. Entgegen der lockeren Ein- und Zweifamilienhausbebauung besitzt die verdichtete Bauweise eine geringere Bedeutung im Bestand. In etwa 80 % der Gemeinden beträgt die Anzahl zwischen 1 % und 20 % am Bestand (Abb. 3).



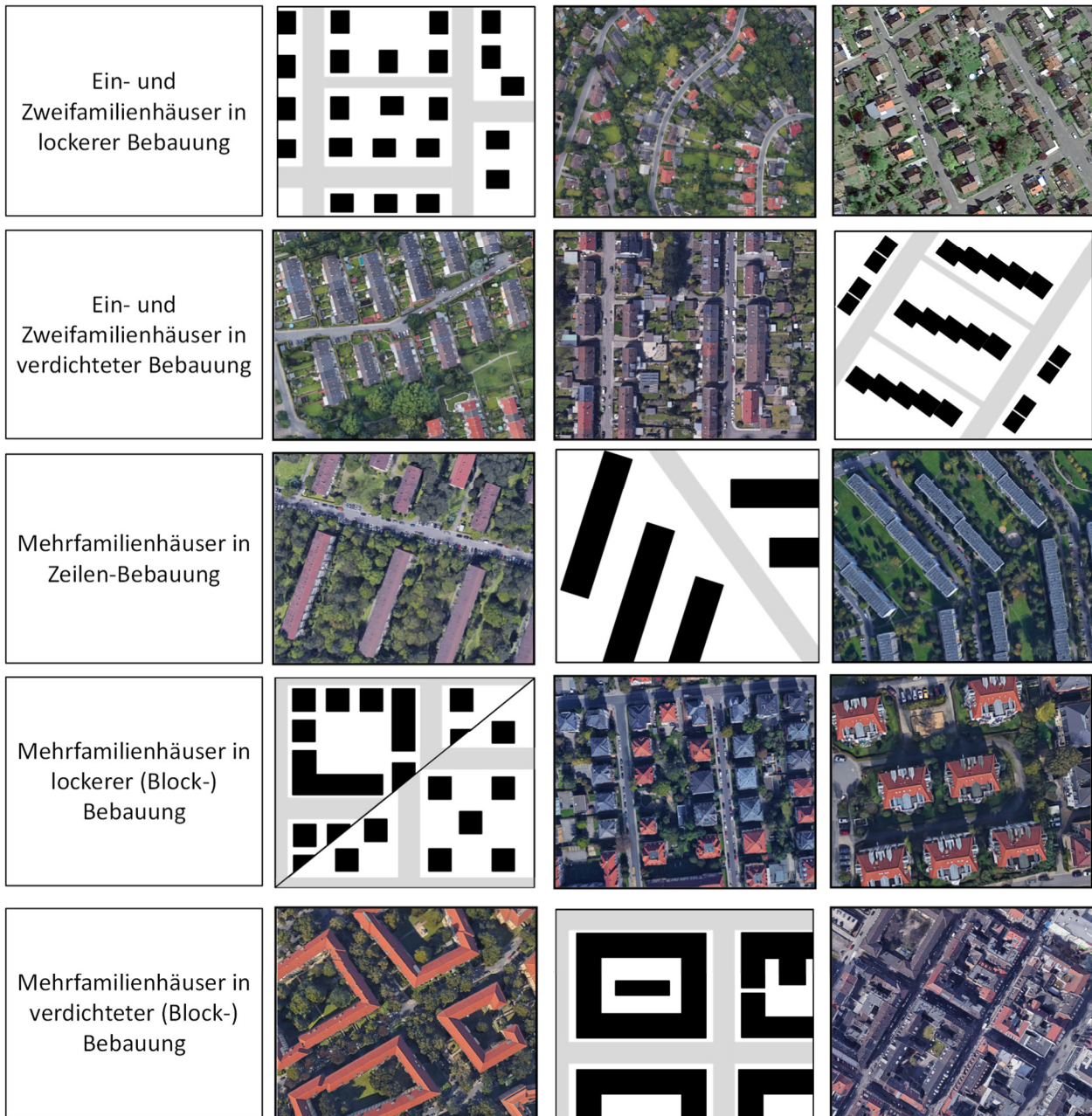
Grafik: Norbert Krauß

Abb. 3: Häufigkeit von Bauweisen des Wohngebäudebestands.

Für Bebauungsformen mit überwiegend Mehrfamilienhäusern wurden die Bebauungsformen mit Zeilen-, Block- und lockerer solitärer/freistehender Bebauung als relevant identifiziert. Eine Häufigkeitsverteilung des Mehrfamilienhausbestands auf die identifizierten Bebauungsformen ist jedoch nur unter mehreren Annahmen möglich und infolgedessen mit größeren Unsicherheiten behaftet. Hierauf wird im Abschnitt 3.1.2 näher eingegangen. Dennoch zeigt die Literaturrecherche, dass der Mehrfamilienhausbestand durch die genannten Bebauungsformen repräsentiert werden kann.

Tab. 2: Strukturtypen des Siedlungsmodells

Strukturtypen	Beschreibung
Bebauungsformen mit Ein- und Zweifamilienhausbebauung	Ein- und Zweifamilienhäuser in lockerer Bebauung Hierbei handelt es sich mehrheitlich um freistehende Eigenheimsiedlungen. I. d. R. besitzen die Gebäude 1-2 Vollgeschosse, selten auch drei. Eine häufige Verbreitung besitzen Satteldächer. Flachdächer sind hingegen seltener anzutreffen. Die Freiflächen unterliegen einer großen Vielfalt und reichen von großzügigen Gärten bis zu dicht bebauten Grundstücken mit Stellplätzen und Garagen. Die Geschossflächendichte ist i. d. R. gering.
	Ein- und Zweifamilienhäuser in verdichteter Bebauung Bei der verdichteten Bebauung mit Ein-/Zweifamilienhäusern handelt es sich meist um Reihen-, Ketten- oder auch Doppelhausbebauungen. Aufgrund ihrer dichten Bebauung besitzen diese i. d. R. kleinen Grundstücke, die über eine ausgeprägte Grünstruktur verfügen. Die Anzahl der Geschosse liegt zwischen 1-3. Die Gebäude besitzen sehr häufig Satteldächer, aber auch Flach- oder Pultdächer sind anzutreffen.
Bebauungsformen mit Mehrfamilienhausbebauung	Mehrfamilienhäuser in Zeilen Mehrfamilienhäuser in Zeilenbauweise besitzen i.d.R. zwischen 2 und 6 Geschosse, vereinzelt auch bis zu 10 Geschosse. Die Zeilenbebauung entstand vor allem in der Phase zwischen den beiden Weltkriegen und sollte eine Abkehr von der verdichteten Blockbebauung darstellen. Daher besitzen Zeilen häufig auch große Grünflächen. Trotz ihrer vergleichsweise hohen Grünflächenanteile kann die Zeilenbebauung durch eine höhere Geschossigkeit eine hohe Geschossflächendichte erreichen.
	Mehrfamilienhäuser in lockerer (Block-) Bauweise Die lockere (Block-)Bebauung zeichnet sich durch freistehende Mehrfamilienhäuser und Doppelhäuser in offener Bauweise aus. Hierdurch besitzt die Bebauungsform verhältnismäßig geringe Überbauungsgrade bei teils erhöhter Geschossflächendichte. Die teils großen Freiflächen werden in Form von Grünflächen, Zufahrten und Stellplätzen genutzt. Infolgedessen ist die Bandbreite der Versiegelung recht groß. Die Anzahl der Geschosse reicht i. d. R. von 2 bis 6 Geschosse.
	Mehrfamilienhäuser in verdichteter (Block-) Bauweise / Innenstadtbebauung Die verdichtete (Block-)Bebauung/ Innenstadtbebauung zeichnet sich durch Mehrfamilienhäuser in geschlossener Bauweise aus. Aufgrund dessen besitzt die Bebauungsform einen hohen Überbauungsgrad und hohe Geschossflächendichte. Die Freiflächen sind häufig versiegelt und werden als Zufahrten und Stellflächen genutzt. Die Anzahl der Geschosse reicht i. d. R. von 2 bis 6 Geschosse.



Quelle: Bilder © 2018 Google. Kartendaten © 2018 GeoBasis-DE/BKG (© 2009). Google Schematische Abbildungen Norbert Krauß

Abb. 4: Schematische Darstellungen und Orthofotos der Strukturtypen

3.1.2 Merkmale und Merkmalsausprägungen der Strukturtypen

Die im vorausgehenden Abschnitt 3.1.1 vorgestellten Strukturtypen zeichnen sich durch eine unbestimmte Anzahl an Merkmalen aus. Die Wahl der Merkmale richtet sich hierbei nach den Anforderungen der Untersuchung und der zugrunde liegenden Zielstellung der Untersuchung. Ausgehend von der Literaturrecherche und den in Kapitel 2 dargelegten Zusammenhänge wurde für die vorliegende Arbeit eine Auswahl relevanter Merkmale,

die für die Modellierung von zentraler Bedeutung sind, getroffen. Dahingehend wurden für die Modellierung die folgenden Merkmale ausgewählt:

- Die Geschossflächenzahl,
- Geschossigkeit,
- Gebäudetyp und Bauweise sowie
- Flächennutzung und Aufteilung (Grünflächen und versiegelte Flächen).

Durch Festlegung der zuvor genannten Merkmale und der Integration der Gebäudevertreter, auf die im Abschnitt 3.2 eingegangen wird, können Merkmale wie z. B. die Bewohner/innendichte und der Grad der Überbauung abgeleitet werden. Nachfolgend werden die einzelnen Merkmale erläutert und die Datengrundlagen sowie die daraus resultierenden Annahmen dargelegt.

Geschossflächenzahl

Die Geschossflächenzahl (GFZ) ist eine Kennzahl aus dem Bau- und Planungsrecht (BauNVO 2013) und beschreibt das Verhältnis zwischen zulässiger Geschossfläche aller zulässigen Bauwerke und dem betreffenden Grundstück (Heisel, J. P. 2013, S. 28-30). Im Rahmen der Stadtplanung und Entwicklung dient die GFZ zur Festsetzung der minimal und maximal zulässigen Nutzungsintensität, welche sich i. d. R. an der baulichen Struktur und der Nutzung (reine Wohngebiete, Gebiete gemischter Nutzung, usw.) orientiert. Im Rahmen der Arbeit kommt der Geschossflächenzahl eine zentrale Bedeutung zu. Untersuchungen z. B. haben diesbezüglich gezeigt, dass die bauliche Dichte, in Form der GFZ, Einfluss auf Energieverbrauch und solare Energiegewinnung/-nutzung hat (vgl. Absatz 2.4). Die GFZ bildet darüber hinaus die Grundlage für weitere Berechnungen und Kennwerte in der Arbeit. Zur Berechnung der Geschossflächenzahl wird die Geschossfläche in Verhältnis zum Grundstück gesetzt.

$$GFZ = \frac{GF \text{ (in } m^2\text{)}}{NWBL \text{ (in } m^2\text{)}} \quad [-] \quad \text{Formel [1]}$$

Handelt es sich hierbei vorrangig um Bauland für Wohnbebauung wird die Grundstücksfläche auch als Wohnbauland bezeichnet. Werden hierbei ausschließlich das Bauland ohne öffentliche Verkehrs- und Grünflächen adressiert wird von Nettowohnbauland [$NWBL_{Grdst}$] gesprochen. Neben der planungstechnischen bzw. regulatorischen Nutzung der GFZ kann diese auch herangezogen werden, um die realisierte Nutzungsintensität auszudrücken. In diesem Zusammenhang wird in mehreren Untersuchungen der Begriff der Geschossflächendichte verwendet (Buchert, M. *et al.* 2004, Siedentop, S. *et al.* 2006, Westphal, C. 2008).

Die Auswertung mehrerer Studien (z. B. in Buchert, M. *et al.* (2004), Everding, D. & Kloos, M. (2007), Blum, A. & Gruhler, K. (2010), Gerstenberg, J. H. *et al.* (2010), Hegger, M. *et al.* (2012), Hegger, M. & Dettmar, J. (2014), Gerstenberg, J. H. *et al.* (2016)) zeigt eine hohe Bandbreite der Geschossflächenzahlen verschiedener Bebauungsformen. Unterschiede in der GFZ vergleichbarer Bebauungsformen können sowohl innerhalb einer Siedlung als auch zwischen ländlich und städtisch geprägten Regionen festgestellt werden. Buchert, M. *et al.* (2004) und Siedentop, S. *et al.* (2006) weisen in diesem Zusammenhang in ihren Untersuchungen auf regionale Dichtegefälle innerhalb gleicher Bebauungsformen hin. Diese Unterschiede sind u. a. auf lokale bauliche Vorgaben, Stadtentwicklungskonzepte (z. B. Urbanität durch Dichte, autogerechte Stadt), Wohnungsnachfrage sowie Preise und Verfügbarkeit von Grundstücken zurückzuführen. Insbesondere in Großstädten werden aufgrund begrenzter Flächenverfügbarkeit und damit verbundenen hohen Bodenpreisen i. d. R. höhere bauliche Dichten realisiert als in kleineren ländlich geprägten Städten und Dörfern (Buchert, M. *et al.* 2004, Schmitt, M. & Seidl, I. 2006).

Analysen amtlicher Statistiken (DESTATIS 2017b) und von Immobilieninseraten bestätigen das regionale Dichtegefälle (Abb. 5). Wie in Buchert, M. *et al.* (2004) wurde hierzu die durchschnittliche Anzahl an Wohnungen je Hektar Wohngebietsfläche⁴ und die Geschossflächendichte berechnet.

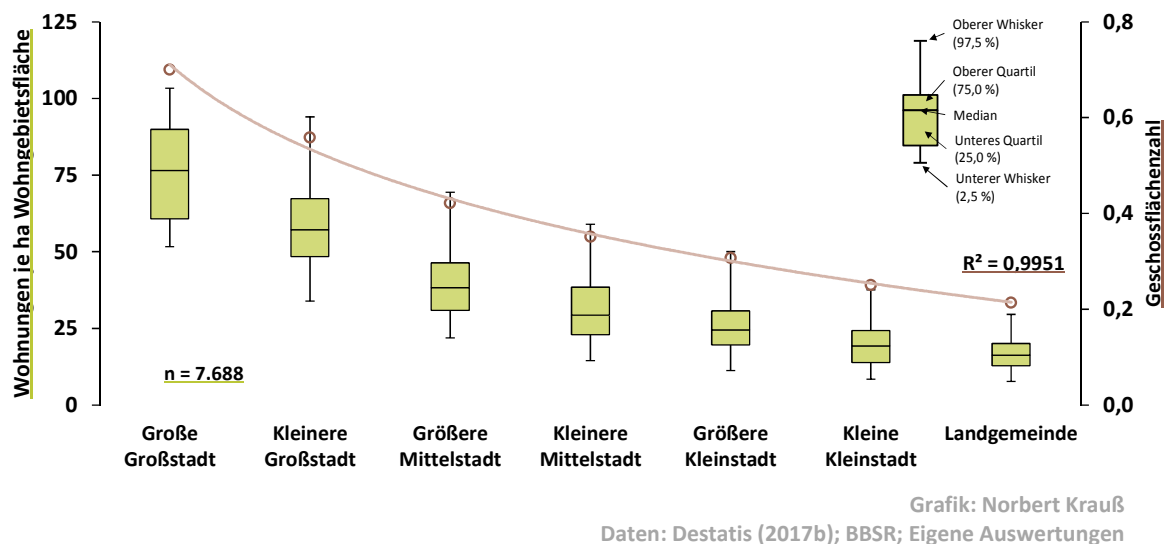


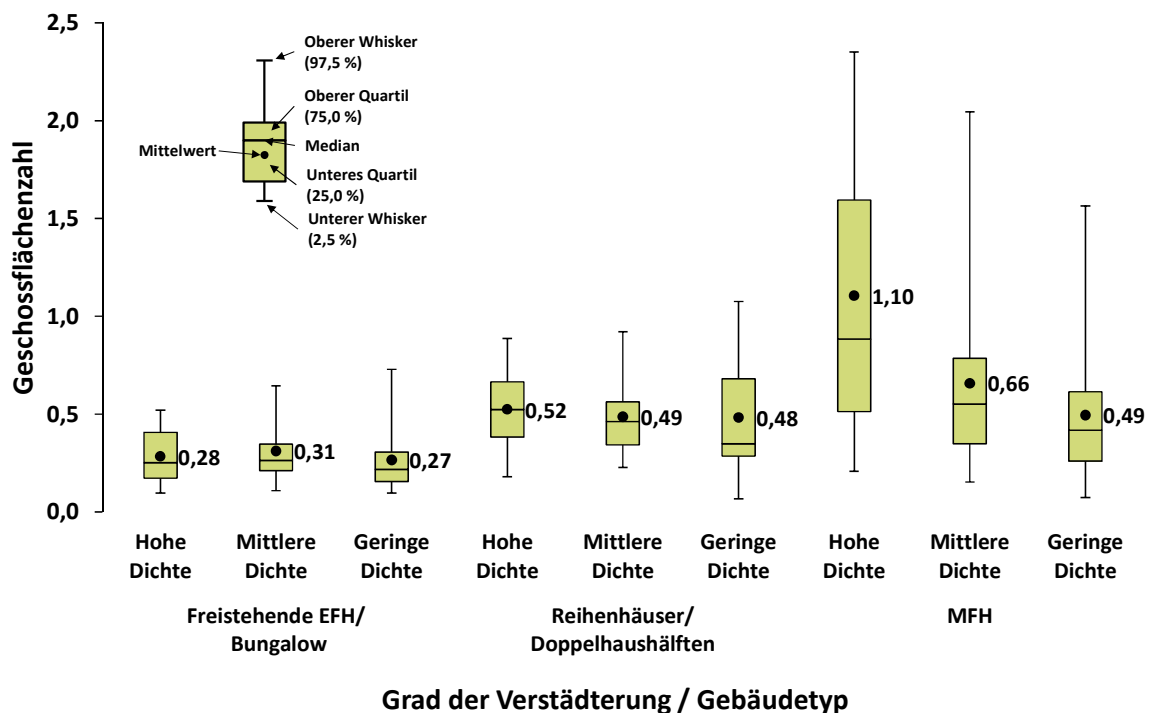
Abb. 5: Wohnungsdichte nach Gemeindetypen des BBSR und abgeleitete Geschossflächenzahl.

Anders als in Buchert, M. *et al.* (2004) wurden für den räumlichen Bezug die Stadt- und Gemeindetypen aus der laufenden Raubeobachtung des Bundesinstituts für Bau-, Stadt- und Raumforschung (BBSR) verwendet. Es zeigt sich, dass die mittlere Anzahl der Wohnungen je Wohngebietsfläche in großen Großstädten am höchsten ist und sich dann

⁴ Gebäude- und Freiflächen, Kategorie „Wohnen“ aus der amtlichen Statistik zur Flächenerhebung nach Art der tatsächlichen Nutzung.

für jeden weiteren Stadt- und Gemeindetyp bis hin zur Landgemeinde verringert. Gleiches gilt für die berechnete Geschossflächendichte (Abb. 5). Diese ergibt sich aus den statistischen Angaben zu den Wohnflächen multipliziert mit 1,25 (Korda M. (Hrsg.) *et al.* 2005) und geteilt durch die Wohngebietsfläche.

Des Weiteren konnte anhand von Immobilieninseraten die Geschossflächendichte in Abhängigkeit des Grads der Verstädterung⁵ (EUROSTAT 2011) berechnet werden. Grundlage für den Grad der Verstädterung (Degree of Urbanisation) sind Rasterzellen mit einer Abmessung von 1 km², die den drei Klassen „dicht“, „mittel“ und „gering“ besiedelte Gebiete zugeordnet werden. Die Einteilung der drei Klassenbereiche wiederum erfolgt auf Basis der Gesamtbevölkerung und der Bevölkerungsdichte innerhalb einer Rasterzelle (EUROSTAT 2011). Die ausgewerteten Immobilieninserate wurden weiterhin in Ein-/Zweifamilien- (EZH) und Mehrfamilienhäuser (MFH) unterteilt.



Grafik: Norbert Krauß
Daten: Immonet, Immoscout Eigene Auswertungen

Abb. 6: Bandbreite und durchschnittliche Geschossflächendichte von freistehenden EFH, Reihenhäuser und MFH nach dem Grad der Verstädterung.

Auf Grundlage der zuvor beschriebenen Auswertungen und Studien werden den Bebauungsformen in Abhängigkeit der Verstädterungs-Klassen Bandbreiten von Geschossflächendichten zugeordnet. Eine mathematische Bestimmung der regionalen Dichtekennwerte erscheint aufgrund der teils geringen Fallzahl und der nur bedingt guten Zuordnung der Daten zu den Bebauungsformen, wie in Buchert *et al.* (2004) angeführt, nicht sinnvoll.

⁵ http://ec.europa.eu/eurostat/ramon/miscellaneous/index.cfm?TargetUrl=DSP_DEGURBA

Daher erfolgt die Zuweisung regionalisierter Geschossflächendichten auf Basis eigener Abschätzungen. Die ausgewiesenen Bandbreiten beziehen sich hierbei auf mittlere Größenordnungen. Extremwerte bleiben hierbei unberücksichtigt.

Tab. 3: Geschossflächendichten (Bandbreiten) nach dem Grad der Verstädterung

Bebauungsform	Geringe Verstädterung		Mittlere Verstädterung		Hohe Verstädterung	
	von	bis	von	bis	von	bis
Ein- und Zweifamilienhäuser in lockerer Bebauung	0,2	0,4	0,2	0,4	0,2	0,4
Ein- und Zweifamilienhäuser in verdichteter Bebauung	0,3	0,5	0,3	0,6	0,4	0,8
Mehrfamilienhäuser in Zeilen	0,5	0,8	1,1	1,5	0,7	1,3
Mehrfamilienhäuser in lockerer (Block-) Bauweise	0,4	0,8	0,9	1,4	1,5	2,2
Mehrfamilienhäuser in verdichteter (Block-) Bauweise / Innenstadtbebauung	1,0	1,4	1,5	1,8	1,9	2,4

Neben der Geschossflächendichte kann zur Beschreibung der baulichen Dichte auch die Kennzahl der Grundflächendichte verwendet werden. Die Grundflächendichte (GRD) ergibt sich aus der durch die Bauwerke bebaute Grundfläche [BF] im Verhältnis zum Nettowohnbauland des Grundstücks, wie in Formel [2] dargelegt.

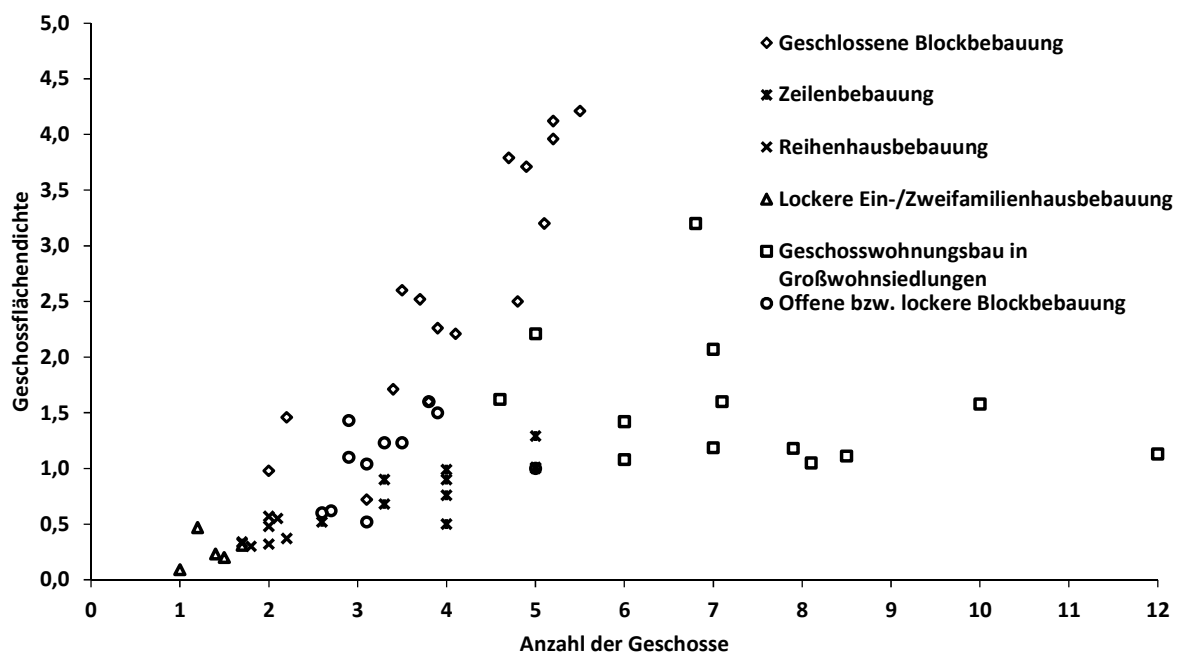
$$GRD = \frac{BF \text{ (in } m^2\text{)}}{NWBL_{Grdst} \text{ (in } m^2\text{)}} \quad [-] \quad \text{Formel [2]}$$

Anders als die GFD besitzt die GRD eine Obergrenze, die den Wert 1 bzw. 100% nicht übersteigen kann. Ein Wert von 1 würde eine vollständige Überbauung des betrachteten Grundstücks bedeuten. Eine Grundflächendichte von 1 bzw. 100% wird jedoch nur in sehr verdichteten Bebauungsstrukturen, z. B. innerstädtischen verdichteten Mischgebieten, erreicht. Mehrheitlich liegen die Grundflächendichten von Wohnbebauungen zwischen 0,1 (lockere freistehende Einfamilienhausbebauung) und 0,7 (Blockrandbebauungen). Grundflächendichte und Geschossflächendichte stehen in einem schwachen bis mittleren Zusammenhang. So führt eine Steigerung der GFD nicht unmittelbar auch zu einer Erhöhung der GRD. Entscheidend hierbei ist, ob die zusätzliche Geschossfläche über weitere Stockwerke hinzukommt oder ob sich die Bebauung in der Horizontalen ausdehnt. Hieraus folgt, dass die GRD mit der GFD steigt, sollte die Geschossigkeit der

Bebauung nicht verändert werden. Nicht unmittelbar hingegen, führt eine Steigerung der GFD zu einer Steigerung der GRD, wenn die zusätzliche Geschossfläche in vertikaler Richtung, also durch zusätzliche Stockwerke hinzukommt.

Geschossigkeit von Bauungsformen

Das Merkmal der Geschossigkeit gibt an, über wie viele Etagen (Geschosse) die Wohn- und Nutzflächen verteilt sind. Unterschiede in der Geschossigkeit können zunächst zwischen den Gebäudearten Ein-/Zweifamilienhaus und Mehrfamilienhaus hervorgehoben werden. Während Ein-/Zweifamilienhäuser i. d. R. bis zu zwei, seltener auch drei, Geschosse besitzen, besitzen Mehrfamilienhäuser mehrheitlich zwischen zwei und 6 Geschosse, in geringerer Anzahl auch mehr (Abb. 7). Ferner zeigt sich, dass zwischen der Bauungsform, der baulichen Dichte und der Geschossigkeit gewisse Zusammenhänge bestehen. Dies wird ersichtlich u. a. in Abb. 7, in der die Geschossflächenzahl unterschiedlicher Bauungsformen zur mittleren Anzahl der Geschosse in Bezug gesetzt wurde.



Grafik: Norbert Krauß

Daten: Markus Blesl (2002); Meinel G. & Hecht R. (2005); Ecofys (2004); Beermann et al. (2013); Kleindienst G. (1985); Heber B. & Lehmann I. (1992 - 1996); Senatsverwaltung für Stadtentwicklung (2010); Coenradie, B. & Haag, L. (2012); Koziol et al. (2011)

Abb. 7: Geschossigkeit von unterschiedlichen Bauungsformen in Abhängigkeit der Geschossflächenendichte.

Aus der Abbildung geht hervor, dass Bauungsformen zum einen mit einer gewissen Geschossflächenzahl und zum anderen mit einer typischen Geschossanzahl verbunden werden können. Je nach Bauungsform ist die Bandbreite unterschiedlich groß. Demnach besitzt der Geschosswohnungsbau in Zeilenbauweise i. d. R. eine Geschossflächenzahl von 0,4 bis 1,3 und 2 bis 6 Vollgeschosse. Der Bereich der Ein-

/Zweifamilienhausbebauung in lockerer und verdichteter Bauweise besitzt hingegen eine Geschossflächenzahl von 0,1 bis 0,7 und i. d. R. 1 bis 2 Vollgeschosse, vereinzelt aber auch bis zu drei Vollgeschosse (Reihenhäuser, Stadthäuser). Auffallend sind die Bauformen der Großwohn- und Hochhaussiedlungen, die 4 bis 12 und mehr Vollgeschosse besitzen, jedoch mehrheitlich vergleichsweise moderate Geschossflächenzahlen von 1,0 bis 2,2 aufweisen. Vergleichbare Zusammenhänge zwischen GFZ und Anzahl an Geschossen zeigt sich in einer Auswertung der amtlichen Statistik aus dem Jahr 1980 (Tab. 4).

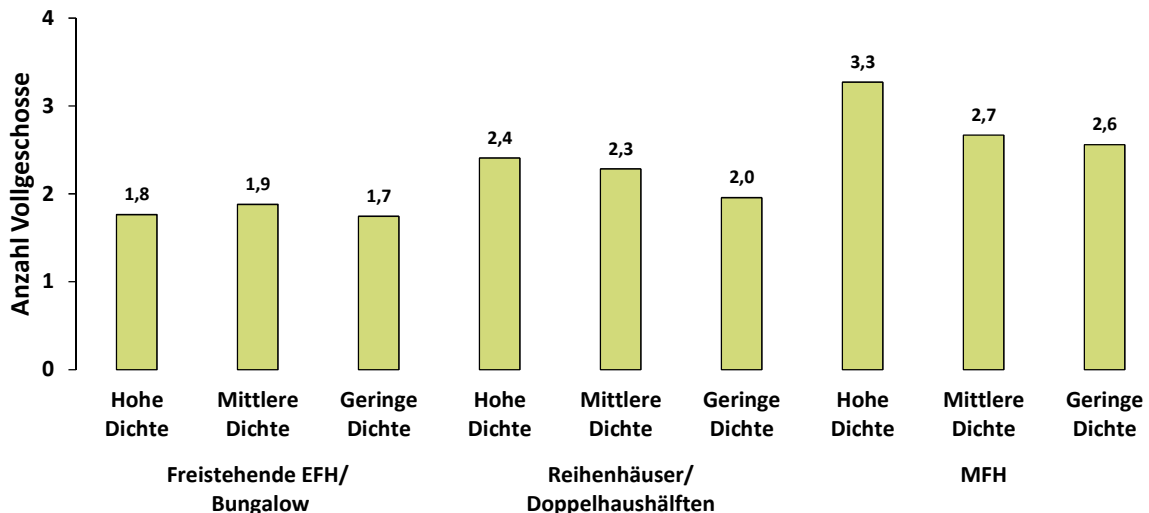
Tab. 4: Anzahl der Vollgeschosse nach der Geschossflächenzahl und der Art der Baulichen Nutzung. (Tabelle aus Blum, A. & Wente, E. (1980) entnommen)

Art der baulichen Nutzung	Geschossflächenzahl (GFZ)	Baugrundstücke mit Bauwerken mit ... Vollgeschossen (in %)			
		1	2	3 + 4	≥5
Reines Wohngebiet	< 0,5	47,6	48,9	3,4	0,0
	0,5 - 0,8	16,9	60,7	21,4	0,0
	0,8 - 1,0	7,8	48,6	39,7	0,0
	1,0 - 1,2	0,0	46,8	43,4	0,0
	> 1,2	0,0	21,3	55,1	19,7
	zusammen	36,3	49,2	12,6	1,8
Allgemeine Wohngebiete	< 0,5	30,3	45,9	3,7	0,0
	0,5 - 0,8	18,9	56,3	24,2	0,0
	0,8 - 1,0	12,2	45,9	40,1	0,0
	1,0 - 1,2	10,4	39,6	44,2	0,0
	> 1,2	4,1	16,7	59,1	20,1
	zusammen	35,9	43,7	17,4	3,0
Mischgebiet	< 0,5	42,4	51,9	3,5	0,0
	0,5 - 0,8	24,2	57,3	17,6	0,0
	0,8 - 1,0	17,3	63,0	28,7	0,0
	1,0 - 1,2	0,0	48,9	37,6	0,0
	> 1,2	4,3	28,6	52,2	14,9
	zusammen	22,4	44,8	27,2	5,0

Aus Tab. 4 geht hervor, dass in Wohngebieten (reines und allgemeines Wohngebiet) und Mischgebieten die Mehrheit der Bauwerke mit einer Geschossflächenzahl von $\leq 0,8$, was i. d. R. bei Eigenheimen und kleineren Mehrfamilienhäusern anzutreffen ist, über ein und zwei Vollgeschosse verfügen. Lediglich ein geringer Anteil der Bauwerke mit einer GFD $\leq 0,8$ besitzt drei und vier Vollgeschosse. Mit steigender Geschossflächenzahl steigt auch der Anteil der Bauwerke, die drei und mehr Vollgeschosse besitzen. Bauwerke mit fünf und mehr Vollgeschossen sind nach der Tabelle erst ab einer Geschossflächenzahl $> 1,2$ anzutreffen.

Wie für die Geschossflächenzahl wurden Hinweise und Daten für Unterschiede in der Geschossigkeit zwischen ländlich und städtisch geprägten Regionen ausgewertet. Hierzu wurden erneut die zuvor genannten Immobilieninsetrate ausgewertet (Abb. 8). Wie auch

bei der Geschossflächenzahl sinkt die mittlere Anzahl an Vollgeschossen mit sinkendem Grad der Verdatterung für die ausgewerteten Reihenhäuser und Doppelhaushalfen sowie Mehrfamilienhäuser (Abb. 8). Der Bestand der freistehenden Einfamilienhäuser und Bungalows hingegen weist ebenfalls, wie bei der Geschossflächenzahl, keinen klaren Trend auf.



Grafik: Norbert Krauß
Daten: Immonet, Immoscout, Eigene Auswertungen

Abb. 8: Mittlere Anzahl an Vollgeschossen von freistehenden EFH, Reihenhäusern und MFH nach dem Grad der Verdatterung.

Aufbauend auf den zugrunde liegenden Studien und eigener Auswertungen wurden für die Bebauungsformen Bandbreiten typischer Geschosshöhen in Abhängigkeit des Verdatterungsgrads abgeleitet (Tab. 5). Nicht berücksichtigt blieben hierbei Extremwerte und Fälle mit geringer Verbreitung, so z. B. Hochhäuser mit mehr als 8 Vollgeschossen.

Tab. 5: Anzahl Vollgeschosse (Bandbreiten) nach dem Grad der Verdatterung

Leittyp der Bebauung	Geringe Verdatterung		Mittlere Verdatterung		Hohe Verdatterung	
	von	bis	von	bis	von	bis
Ein- und Zweifamilienhäuser in lockerer Bebauung	1	2	1	2	1	2
Ein- und Zweifamilienhäuser in verdichteter Bebauung	1	2	2	3	2	3
Mehrfamilienhäuser in Zeilen	2	3	3	5	4	6
Mehrfamilienhäuser in lockerer (Block-) Bauweise	2	4	3	5	3	8
Mehrfamilienhäuser in verdichteter (Block-) Bauweise / Innenstadtbebauung	2	3	3	5	3	6

Gebäudetyp und Bauweise in Bebauungsformen

Der Gebäudetyp bezieht sich auf die Anzahl der Wohnungen im Gebäude. Diesbezüglich werden im Siedlungsmodell Ein- und Zweifamilienhäuser (Wohngebäude mit bis zu 2 Wohnungen), kleine Mehrfamilienhäuser (mit 3 bis 6 Wohnungen), mittlere Mehrfamilienhäuser (mit 7 bis 12 Wohnungen) und große Mehrfamilienhäuser (mit 13 und mehr Wohnungen) unterschieden.

Gemäß der Unterteilung des Zensus 2011 werden die Gebäudetypen hinsichtlich ihrer Bauweise in „freistehende Wohngebäude“, „Gebäude als Doppelhaus“ und „Gebäude gereiht“ sowie „anderer Gebäudetyp“ differenziert (Statistische Ämter des Bundes und der Länder 2014b). Die Bauweise „Gebäude gereiht“ umfasst hierbei nicht nur Reihen-, Zeilen- und Kettenhäuser, sondern beinhaltet auch Bauformen, in der Gebäude angrenzend zueinander errichtet wurden (gereiht), so z. B. bei der Blockbauweise. Gebäude der Kategorie „anderer Gebäudetyp“ werden keinem der drei Gebäudetypen „freistehende Wohngebäude“, „Gebäude als Doppelhaus“ und „Gebäude gereiht“ zugeordnet. Hierbei kann es sich z. B. um einen Vierseitenhof handeln.

Tab. 6: *Bebauungsformen, Gebäudetypen und Bauweisen*

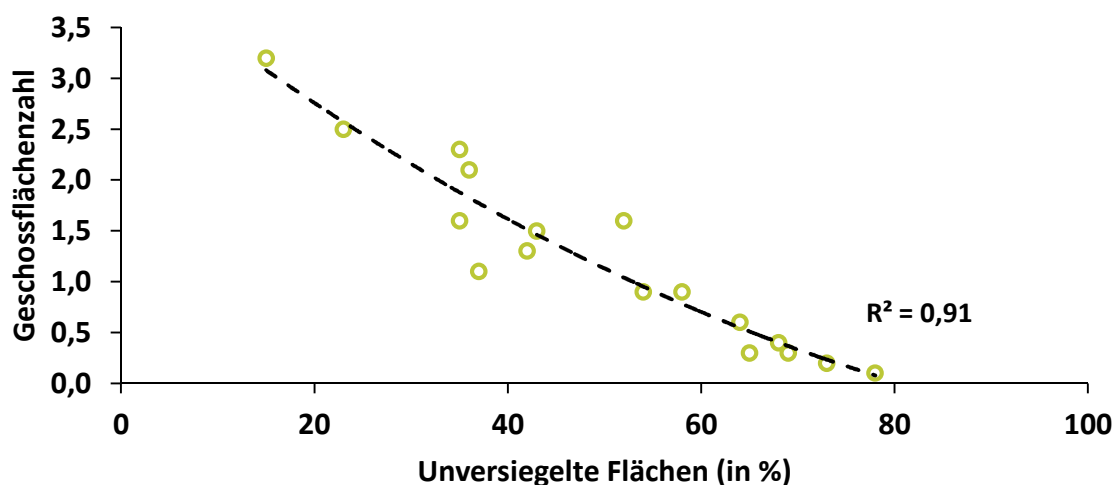
Bebauungsformen	Gebäudetyp	Bauweise
Freistehende Ein- und Zweifamilienhäuser	Ein- und Zweifamilienhäuser (bis 2 Wohneinheiten)	freistehende Wohngebäude
Ein- und Zweifamilienhäuser als Doppel- und Reihenhäuser	Ein- und Zweifamilienhäuser (bis 2 Wohneinheiten)	Gebäude als Doppelhaus und Gebäude gereiht
Mehrfamilienhäuser in Zeilenstruktur	Mehrfamilienhäuser (mit 3 und mehr Wohneinheiten)	Gebäude gereiht
Geschosswohnungsbau in offener Bauweise	Mehrfamilienhäuser (mit 3 und mehr Wohneinheiten)	freistehende Wohngebäude
Mehrfamilienhäuser in verdichteter Blockstruktur	Mehrfamilienhäuser (mit 3 und mehr Wohneinheiten)	Gebäude als Doppelhaus und Gebäude gereiht

Die Unterteilung in Gebäudetyp und Bauweise ermöglicht es, den Gebäudebestand eines Untersuchungsgebietes zunächst grob den Bebauungsformen zuzuordnen. So können z. B. der Bebauungsform „Ein- und Zweifamilienhäuser als Doppel- und Reihenhäuser“ die Gebäude des Typs Ein- und Zweifamilienhäuser (Wohngebäude mit bis zu 2 Wohnungen) mit der Bauweise „Gebäude als Doppelhaus“ und „Gebäude gereiht“ zugewiesen werden. Im Fall der Mehrfamilienhäuser werden weitere Anhaltspunkte benötigt, die jedoch im Einzelfall durch die Fallbeispiele bereitgestellt oder spezifischen Informationen zu diesen entnommen werden können. Dies können z. B. Kartierungen, Statistiken zu Stadtteilen, usw. sein. Hierauf wird im Abschnitt „Fallstudie“ näher eingegangen.

Grünflächenanteil innerhalb von Bebauungsformen

Die solarenergetische Nutzung von Dach- und Fassadenflächen im urbanen Raum ist mittlerweile weit verbreitet und akzeptiert. Darüber hinaus sind in den letzten Jahren auch Grünflächen vermehrt als Energieertragsflächen in den Fokus gerückt. So werden mittlerweile vereinzelt innerstädtische Brach- und Grünflächen für den Anbau von Kurzumtriebsplantagen für energetische Zwecke genutzt (Thrän, D. *et al.* 2010). Aber auch die im Rahmen von Pflegemaßnahmen anfallenden Grünabfälle können einer energetischen Nutzung zugeführt werden. Aufgrund dessen stellt die Vegetation auf innerstädtischen Grünflächen eine potenzielle regenerative Energiequelle dar. Während die kommunalen Grünflächen bzw. die daraus hervorgehenden Grünabfälle weitestgehend erfasst werden, ist die Datenlage und das Potenzial von Grünabfällen aus privaten Grünflächen größtenteils unbekannt. Zwar werden in der amtlichen Statistik die Grünabfälle privater Haushalte erfasst, jedoch geben diese Zahlen nur bedingt Auskunft über das tatsächliche Potenzial von Grünabfällen wieder, da u. a. unbekannt ist wie viele Haushalte Eigenkompostierung betreiben und in welchem Umfang. Auch zur Zusammensetzung der Grünabfälle liegen nur von einzelnen Fallstudien Daten vor.

Zur Berechnung des Potenzials organischer Grünabfälle für die energetische Verwertung gilt es dahingehend zunächst die privaten Grünflächen in der Wohnbebauung zu ermitteln. Als private Grünflächen werden im Rahmen der vorliegenden Arbeit ausschließlich die auf den Grundstücken des Wohnungsbaus bepflanzten und unversiegelten Flächen verstanden. Kommunale Grünflächen (z. B. Friedhöfe, Parks, usw.) sowie Straßenbegleitflächen werden hierbei nicht berücksichtigt. Gemeinsam mit Flächenertragskennwerten, auf die im Abschnitt 5.2 eingegangen wird, wird das Grünaufkommen für die Bebauungsformen berechnet.



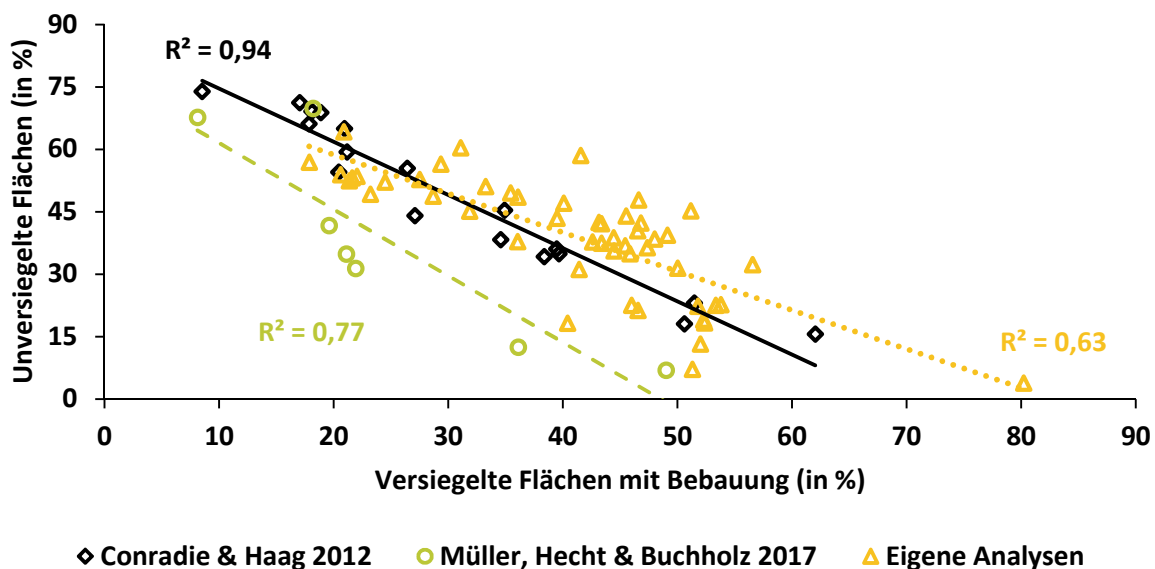
Grafik: Norbert Krauß

Daten: Coenradie, B. & Haag, L. (2012)

Abb. 9: Versiegelungskartierung Berlin (Datenbasis Coenradie, B. & Haag, L. 2012)

Untersuchungen von Coenradie, B. & Haag, L. (2012), Gerstenberg, J. H. *et al.* (2010), Gerstenberg, J. H. *et al.* (2016), Arlt, G. *et al.* (2005), Müller, N. *et al.* (2017) und Arlt, G. & Lehmann, I. (2005) zeigen diesbezüglich, dass der Anteil der Grünflächen und die Bebauungsform in Zusammenhang stehen. So nehmen Grünflächen je nach Bebauungsform einen unterschiedlich großen Anteil des Grundstücks ein. Hierbei spielt insbesondere die bauliche Dichte der Bebauungsformen eine zentrale Rolle. Am Beispiel der Versiegelungskartierung von Berlin wird ersichtlich (Abb. 9), dass Bauformen mit hoher baulicher Dichte (hier GFZ) sich durch geringe Grünflächenanteile auszeichnen.

Eine weitere Möglichkeit zur Abschätzung der unversiegelten Flächen und damit von Grünflächen bietet die Gegenüberstellung von versiegelten bebauten Flächen und unversiegelten Flächen, wie dies in Abb. 10 dargelegt ist. Untersuchungen von Coenradie, B. & Haag, L. (2012), Müller, N. *et al.* (2017) sowie eigene Erhebungen im Rahmen der vorliegenden Arbeit zeigen, dass mit steigendem Anteil bebauter Flächen der Anteil unversiegelter Flächen bzw. Grünflächen sinkt (Abb. 10).



Grafik: Norbert Krauß

Abb. 10: Zusammenhang zwischen dem Anteil der versiegelten Flächen mit Bebauung und der unversiegelten Flächen für Strukturen der Wohnbebauung.

Auf Basis der zugrundeliegenden Untersuchungen und Kennwerte wurde mittels einer Trendanalyse eine Funktion (Formel [3]) für die Berechnung des Grünflächenanteils ermittelt. Aus den Untersuchungen geht dahingehend hervor, dass Grundstücke mit hohem Überbauungsgrad (> 80 %) i. d. R. kaum noch über Grünflächen verfügen. Daher wird für die Berechnungen bei einer Grundflächenzahl von > 80 % angenommen, dass der unversiegelte Anteil bzw. der Grünflächenanteil auf null sinkt.

$$\%_{\text{Grünfläche}} = -100\% * \%_{\text{GRD}} + 80\%; > 0,8_{\text{GRZ}} \rightarrow \%_{\text{Grünfl.}} \quad [\%] \quad \text{Formel [3]}$$

Werden bebaute Fläche und die berechnete Grünfläche von der Gesamtfläche des Grundstücks abgezogen, dann ergeben sich die verbleibenden Flächen, die versiegelt, jedoch unbebaut sind (z. B. Stellflächen, Innenhöfe, Zuwege, Terrassen, usw.).

$$\begin{array}{l} \text{Versiegelte Fläche} \\ \text{ohne Bebauung} \end{array} = 100\% - (\%_{\text{BF}} + \%_{\text{Grünfl.}}) \quad [\%] \quad \text{Formel [4]}$$

Nachdem mittels der dargelegten Formel der Grünflächenanteil ermittelt werden kann, gilt es die Grünflächen anhand der darauf vorkommenden Vegetation, z. B. Rasen- und Beetflächen sowie Baum- und Heckenflächen, zu unterteilen. Dies ist für die Berechnung des Biomassepotenzials und dessen energetische Verwertung von Bedeutung. So liefern Rasen- und Beetflächen vor allem krautige unverholzte Biomasse (Gräser, Blumen sowie Früchte) und Baum- und Heckenflächen mehrheitlich holzige Biomasse (Äste, Stämme und Abfälle von verholzten Hecken und Sträuchern). Eine Differenzierung in die beiden Fraktionen krautige unverholzte und holzige Biomasse ist notwendig, da sich krautige unverholzte Biomasse u. a. in Menge, Physis, Verwertung und folglich der energetischen Nutzung von holziger Biomasse unterscheidet.

Informationen und Untersuchungen zur Strukturierung und Bepflanzung der Grünflächen in Siedlungsgebieten liegen nur für einzelne Gebiete und punktuelle Fallstudien vor. So konnten den Untersuchungen der projects energy gmbh (2009), in Giesa, P. S. & Tiebel, C. (2012) und Adwiraah, H. (2015) Informationen zur Strukturierung der Grünflächen entnommen werden. Alle drei Studien untersuchten das Biomassepotenzial ausgewählter Fallstudiengebiete und analysierten u. a. hierzu anhand von Luftbilddauswertungen die Grünflächen und deren Vegetationsstruktur von Wohngebieten. Die Untersuchungen von projects energy gmbh (2009) und Adwiraah, H. *et al.* (2014) wiesen für Rasen einen Anteil von 55 % bzw. 47 %, für Gemüse- und Blumenbeete 11 % bzw. 9 % und für Hecken und Gehölze 44 % bzw. 34 % der Grünfläche aus (Tab. 7). In Giesa, P. S. & Tiebel, C. (2012) sind Rasen- und Beetflächen zusammengefasst und beanspruchen 79 % in Einfamilienhausgebieten und 83 % der Gartenfläche in Mehrfamilienhausgebieten. Hecken- und Gehölze nehmen folglich etwa 21 % (EZH) bzw. 17 % (MFH) der Gartenfläche ein und liegen damit bei etwa der Hälfte der in projects energy gmbh (2009) und Adwiraah, H. (2012) angegebenen Werte (Tab. 7). Worauf die Unterschiede der Hecken- und Gehölzanteile zurückzuführen sind konnte nicht geklärt werden. Als mögliche Erklärungsansätze können z. B. unterschiedliche Definitionen und Zuordnungen der Vegetation, die Qualität der Luftbilddaufnahmen oder auch die Vorgehensweise angeführt werden.

Tab. 7: Aufteilung der Grün-/Gartenflächen nach Vegetationsflächen in Ein- und Mehrfamilienhausbebauungen.

Art der Grünfläche	Einfamilienhausgebiete				Mehrfamilienhaus-gebiete		
	in % ¹	in % ²	in % ³	in % ⁴	in % ²	in % ³	in % ⁴
Rasen	47	55	60	79	55	63	83
Beete und Blumen	9	11			8		
Hecken und Gehölze	44	34	40	21	37	37	17

¹ Adwiraah, H. (2012); ² projects energy gmbh (2009); ³ Eigene Auswertung; ⁴ Giesa, P. S. & Tiebel, C. (2012)

Zur Überprüfung der zuvor dargelegten Literaturkennwerte wurden im Rahmen der Arbeit manuelle Luftbildauswertungen zur Struktur und Bepflanzungscharakteristik von Wohngebieten anhand von Fallstudien durchgeführt. Mit rund 60 % in Einfamilienhausgebieten und 63 % in Mehrfamilienhausgebieten liegen die Anteile für Rasen- und Beetflächen in einer vergleichbaren Größenordnung wie in den Untersuchungen von projects energy gmbh (2009) und Adwiraah, H. (2012). Die verbleibenden Hecken- und Gehölzflächen beanspruchten demnach in Einfamilienhausgebieten 40 % und in Mehrfamilienhausgebieten 37 % (Tab. 7).

Trotz gewisser Bandbreiten liefern die zuvor dargelegten Studien eine erste Größenordnung zur vegetationsbezogenen Grünflächenaufteilung. Eine Differenzierung zwischen den Bauungsformen mit Ein-/Zweifamilienhäusern und Mehrfamilienhäusern ist aufgrund der zur Verfügung stehenden Daten nicht möglich bzw. liefern die Daten keine ausreichenden Hinweise auf eine Unterscheidung zwischen den Wohnformen. Aufgrund dessen wird für alle Bauungsformen ein Rasen- und Beetflächenanteil von 60 % und für Baum- und Gehölzflächen ein Anteil von 40 % angenommen. Ebenfalls keine Belege konnten für Unterschiede der Grünflächenanteile zwischen ländlich und städtisch geprägten Regionen gefunden werden. Infolgedessen wird auch hier auf eine Differenzierung der Grünflächenanteile verzichtet.

3.1.3 Herleitung der Strukturtypen

Die zuvor beschriebenen Merkmale und deren Merkmalsausprägungen bilden die Grundlagen der Strukturtypen. Ziel ist es aus den Merkmalen und deren Ausprägungen Strukturtypen herzuleiten, auf deren Basis der Energiebedarf (Strom-, Warmwasser- und Heizwärmebedarf) und das Potenzial regenerativer Energien für die einzelnen Strukturtypen und für größere Untersuchungsräume, z. B. eine Gemeinde, berechnet werden können. Hierzu wird nachfolgend ein iterativer Prozess der Herleitung der Strukturtypen beschrieben.

1. In einem ersten Schritt werden die Wohngebäude auf die verschiedenen Strukturtypen aufgeteilt. Hierbei ist zu berücksichtigen, dass bestimmte Gebäudetypen nur spezifischen Strukturtypen zugeordnet werden sollten, wie in Tab. 6 aufgeschlüsselt. Anhand der Aufschlüsselung in Tab. 6 kann die Mehrheit der Wohngebäude bereits den Strukturtypen zugeordnet werden. Ausnahme bildet hierbei jedoch die Kategorie der „gereihten Wohngebäude mit 3 und mehr Wohneinheiten“. Diese können sowohl dem Strukturtyp „Zeilenbebauung“ und dem Strukturtyp „Mehrfamilienhäuser in verdichteter (Block-) Bauweise / Innenstadtbebauung“ zugeordnet werden. Für die Aufteilung der gereihten Wohngebäude mit 3 und mehr Wohneinheiten können bestehende Kartierungen zum Untersuchungsgebiet oder Kartierungen anderer Untersuchungsräume, wie in Abschnitt 6.1.3 genannt, herangezogen werden.
2. Nachdem die Wohngebäude den Strukturtypen zugeordnet wurden, gilt es die bauliche Dichte mittels des Kennwerts „Geschossflächendichte“ für jeden Strukturtyp festzulegen. Sollten keine näheren Informationen für den Untersuchungsraum vorliegen, können die Bandbreiten aus Tab. 3 als Orientierung herangezogen werden. Für die Bestimmung des Verdichtungsgrads des Untersuchungsgebietes ist wie unter dem Absatz *Geschossflächenzahl* auf Seite 33-34 beschrieben vorzugehen.
3. Durch die Setzung der Geschossflächendichten und die spätere Zuordnung der Gebäudevertreter werden die Strukturtypen mit Informationen zu Geschoss- und Wohnfläche, Dachfläche, Dachneigung und Dachform, Belegungszahl, Anzahl der Geschosse, usw. ergänzt. Weiterhin wird durch die Festlegung der Geschossflächendichte und der Zuordnung der Gebäudevertreter kann die Fläche des Strukturtyps (Nettobauland) berechnet werden.
4. Liegen Informationen zur Fläche der Strukturtypen und der Grundflächendichte vor, können die bebaute Fläche, die versiegelte Freifläche und die Grünfläche anhand der Beschreibung auf Seite 42-43 berechnet werden.
5. Abschluss bildet die Aufteilung der Grünflächen auf die Vegetationsflächen Rasen- und Beetflächen sowie Baum- und Gehölzflächen gemäß den Annahmen auf Seite 43.

3.2 Gebäudevertreter

Der Bestand der Wohnbauten setzt sich aus einer Vielzahl unterschiedlicher Bauwerke zusammen, die sich in Form, Größe, Anzahl der Wohnungen, energetischem Standard sowie weiteren Merkmalen unterscheiden. Trotz dieser Unterschiede besitzen Wohngebäude auch Gemeinsamkeiten, anhand derer die Gebäude in Gruppen zusammengefasst und von anderen Gebäudegruppen abgegrenzt werden können (Gruhler, K. *et al.* 2002). Diese Gebäudegruppen werden in der vorliegenden Arbeit durch idealisierte Gebäudevertreter repräsentiert. Um einen solchen idealisierten Gebäudevertreter handelt es sich dann, wenn einzelne Merkmale und Details, wie z. B. Farbe der Außenwand, Gebäudeform, mit oder ohne Erker, vernachlässigt werden können, da diese Details für die Untersuchung vernachlässigbar sind. D. h., es handelt sich um eine zweckrationale Vereinfachung realer Gegebenheiten. Ein solches Beispiel ist das „Einfamilienhaus“, welches z. B. in der amtlichen Statistik oder auch in der Presse und Literatur genannt wird. Dabei gibt es das eine „Einfamilienhaus“ nicht (Blum, A. & Gruhler, K. 2010). Vielmehr handelt es sich hierbei um eine große Vielfalt unterschiedlicher Gebäude, die ausgewählte Merkmale (Haus im Grünen, bewohnt von einem Haushalt, usw.) besitzen, unabhängig davon, ob sie sich bei anderen Merkmalen oder Details (Wandfarbe, Dachform, usw.) voneinander unterscheiden.

Die Herleitung von Gebäudevertretern richtet sich, wie auch die Strukturtypen, nach der zugrunde liegenden Forschungsfrage. Mit den Typologien des Instituts für Wohnen und Umwelt (IWU), der Arbeitsgemeinschaft für zeitgemäßes Bauen e.V. (ARGE) oder des Instituts für ökologische Raumentwicklung e. V. (IÖR), um nur eine kleine Auswahl zu nennen, liegen bereits mehrere Typologien vor, die z. B. Forschungsfragen bezüglich des Energieverbrauchs oder der Ressourceninanspruchnahme adressieren. Mit Hilfe der Typologien wird die hohe Komplexität der gebauten Umwelt reduziert, was die Untersuchung und Analyse dieser vereinfacht. Durch die Erarbeitung und Zuordnung von Gebäudevertretern zu Strukturtypen ist es möglich die Strukturtypen mit spezifischen Informationen auszustatten, die notwendig sind, um Analysen auf teilstädtischer und städtischer Ebene durchzuführen. Um die, der vorliegenden Arbeit, zugrunde liegenden Forschungsfragen zu beantworten wurde dahingehend eine Systematik zur Herleitung von Gebäudevertretern erarbeitet, auf die nachfolgend eingegangen wird.

3.2.1 Systematik der Gebäudevertreter

Ziel der Systematik ist die Herleitung von Gebäudevertretern. Hierbei sollen insbesondere regionale und lokale Spezifika Berücksichtigung finden. Um dies zu ermöglichen, wird auf Daten der amtlichen Statistik und hierbei insbesondere auf die Daten des Zensus 2011 zurückgegriffen. Die im Zensus 2011 hinterlegten Daten reichen bis auf die Gemeindeebene und ermöglichen somit die Berücksichtigung lokaler Gegebenheiten des Wohnungsbestands und der Privathaushalte. Dies umfasst z. B. Daten zum Wohnungs-

bestand, den Wohngebäuden differenziert nach Anzahl der Wohnungen, den Wohnflächen, der Bewohnerschaft und Haushalten der jeweiligen Gemeinde.

Nach eingehender Prüfung der bereits vorhandenen Typologien sowie relevanter Studien wurde eine generische Systematik als geeignete Lösung identifiziert. Vergleichbare Ansätze wurden z. B. von Loga, T. *et al.* (2005) und Vallentin, R. (2011) erarbeitet. Der Vorteil generischer Gebäudevertreter gegenüber bereits bestehenden Typologien ist die hohe Flexibilität und Fähigkeit entlang definierter Berechnungsregeln lokale Spezifika in den Gebäudevertretern und den Strukturtypen zu berücksichtigen.

Ausgehend von den Daten der amtlichen Statistik werden sogenannte Berechnungsregeln erarbeitet, die es erlauben für jede Gemeinde spezifische Gebäudevertreter mit einem Grundstock an Informationen herzuleiten. Da die Gebäudevertreter in die Strukturtypen einfließen, werden auch diese durch lokale Spezifika geprägt. Trotz des umfangreichen Datenbestands der amtlichen Statistik fehlen Informationen zu zentralen Merkmalen, so z. B. Geschossigkeit, Dachform, Dachneigung und die Geometrien (Breite, Länge, Höhe) der Wohngebäude. Infolgedessen ist es erforderlich die amtlichen Statistiken, um weitere Daten zu ergänzen. Hierzu wird auf wissenschaftliche Veröffentlichungen, Online-Datenbank und Fachliteratur zurückgegriffen.

In den nachfolgenden Abschnitten wird hierzu auf die zentralen Merkmale näher eingegangen. Dies beinhaltet jeweils eine kurze Beschreibung der Merkmale, deren Datengrundlage und Berechnungsansätze.

3.2.2 Merkmale und Merkmalsausprägungen der Gebäudevertreter

Wohnfläche

Die Wohnfläche ist die zentrale Bezugsgröße und bildet die Ausgangsbasis zur Berechnung weiterer Kennwerte und Parameter (z. B. Geschossfläche, Anzahl der Bewohner/innen, Heizenergiebedarf usw.) der Gebäudevertreter.

Die Wohnfläche [WFI] der Gebäudevertreter kann gemäß der folgenden Formel anhand der gesamten Wohnfläche [$WFl_{Ges.}$] der Gebäudevertretergruppe [i] (EZH, DH/RH, KMH, MMH, GMH) und der Gesamtzahl der entsprechenden Wohngebäude ($nWG_{Ges.}$) ermittelt werden. Für die Berechnungen der Gebäudevertreter wird die mittlere Wohnfläche je Gebäudegruppe zugrunde gelegt.

$$\emptyset WFl_i = \frac{WFl_{Ges.}}{nWG_{Ges.}} \quad [-] \quad \text{Formel [5]}$$

Deutschlandweite Daten zur Wohnfläche werden von den amtlichen Statistikstellen, Statistischen Bundesamt (DESTATIS) und den statistischen Landesämtern in regelmäßigen Abständen erhoben bzw. fortgeschrieben und stehen zur freien Verfügung. Grundlage für

die späteren Berechnungen bildet die Datenbasis des Zensus 2011, der kleinteilige regionalisierte Daten zur Wohnfläche in den Gemeinden Deutschlands enthält.

Geschossfläche

Die Geschossfläche ist eine Bezugsfläche aus dem Bau- und Planungsrecht und umfasst nach § 20 der Baunutzungsverordnung (BauNVO 2013) alle Grundflächen, die sich in Vollgeschossen befinden und deren Deckenoberkante mindestens 1,4 Meter⁶ über dem Gelände liegen (Heisel, J. P. 2013). In die Berechnung der Geschossfläche gehen die Außenmaße der Bauwerke ein. Nicht berücksichtigt werden hingegen Flächen von Balkonen, Loggien und Terrassen. Die Geschossfläche dient darüber hinaus zur Ermittlung der baulichen Nutzungsintensität von Grundstücken und Baugebieten. Auf diesen Aspekt wird nachfolgend noch näher eingegangen.

Anders als für die Wohnfläche liegen für die Geschossfläche keine amtlichen Statistiken oder deutschlandweite Erhebungen vor. Sie kann jedoch überschlägig anhand der Wohnfläche mittels eines Faktors $[f_{GFl}]$ wie folgt berechnet werden:

$$GFl = WFl \cdot f_{GFl} \quad [m^2] \quad \text{Formel [6]}$$

Je nach Literatur bewegt sich dieser Faktor $[f_{GFl}]$ zwischen 1,2 und 1,4 (siehe Tab. 8).

Tab. 8: Literaturwerte für die Berechnung der Geschossfläche ausgehend von der Wohnfläche.

Quellen	Gebäudetyp	Mittelwert	Min.	Max.
Korda M. (Hrsg.) <i>et al.</i> (2005)	k. A.	1,25	1,22	1,32
Prinz, D. (1999)	k. A.	1,20		
Hegger, M. <i>et al.</i> (2012)	EFH	1,32		
	ZFH	1,25		
	MFH	1,22		
(Achterberg, G. 1973, Voigt, H. 1973, Wirth, G. 1976, Dittrich, G. G. 1979)	EFH	1,29	1,14	1,40
	MFH	1,40	1,29	1,64

⁶ Die Mindestanforderungen können in Abhängigkeit des Bundeslandes und der jeweils gültigen Landesbauordnung hiervon abweichen.

Anzahl Wohnungen

Die Anzahl der Wohnungen gibt an, wie viele Wohnungen bzw. Wohneinheiten sich in einem Gebäude befinden. Mit der Anzahl der Wohnungen wird auch die Anzahl der Haushalte bzw. umgangssprachlich auch Familien verbunden, die in einem Gebäude wohnen. Wohngebäude werden daher u. a. auch in Ein-, Zwei- und Mehrfamilienhäuser unterteilt. Ein- und Zweifamilienhäuser werden häufig in einer Kategorie zusammengefasst. Während bei Ein- und Zweifamilienhäusern die Namensgebung die Anzahl der Wohnungen vorgibt, gibt es bei Mehrfamilienhäusern zwar eine Mindestanzahl, jedoch keine Obergrenze der Wohnungsanzahl. Zur weiteren Differenzierung werden Mehrfamilienhäuser daher i. d. R. in Anlehnung an das Statistische Bundesamt (DESTATIS) nochmals in die drei Unterkategorien „Mehrfamilienhäuser mit 3-6“, „Mehrfamilienhäuser mit 7-12“ und „Mehrfamilienhäuser mit 13 und mehr Wohnungen“ unterteilt (Landesamt für Statistik Niedersachsen 2015).

Für die Erarbeitung der Gebäudevertreter und die damit verbundenen Berechnungen wird die zuvor aufgezeigte Systematik des Statistischen Bundesamtes übernommen. Die Gruppe der Mehrfamilienhäuser wird hierzu in die Untergruppen „Mehrfamilienhäuser mit 3-6 (KMH)“, „Mehrfamilienhäuser mit 7-12 (MMH)“ und „Mehrfamilienhäuser mit 13 und mehr Wohnungen (GMH)“ unterteilt. Für jede dieser Gruppen wird die durchschnittliche Anzahl an Wohnungen [$\emptyset WE$] gemäß den folgenden Formeln berechnet.

- Ein-/Zweifamilienhäuser (EZH) mit 1 bis 2 Wohnungen:

$$\emptyset WE_{EZH} = \frac{(nWE_{WG_1WE} + nWE_{WG_2WE})}{(nWG_{WG_1WE} + nWG_{WG_2WE})} \quad [-] \quad \text{Formel [7]}$$

- Kleine Mehrfamilienhäuser (KMH) mit 3 bis 6 Wohnungen:

$$\emptyset WE_{KMH} = \frac{nWE_{WG_3-6WE}}{nWG_{WG_3-6WE}} \quad [-] \quad \text{Formel [8]}$$

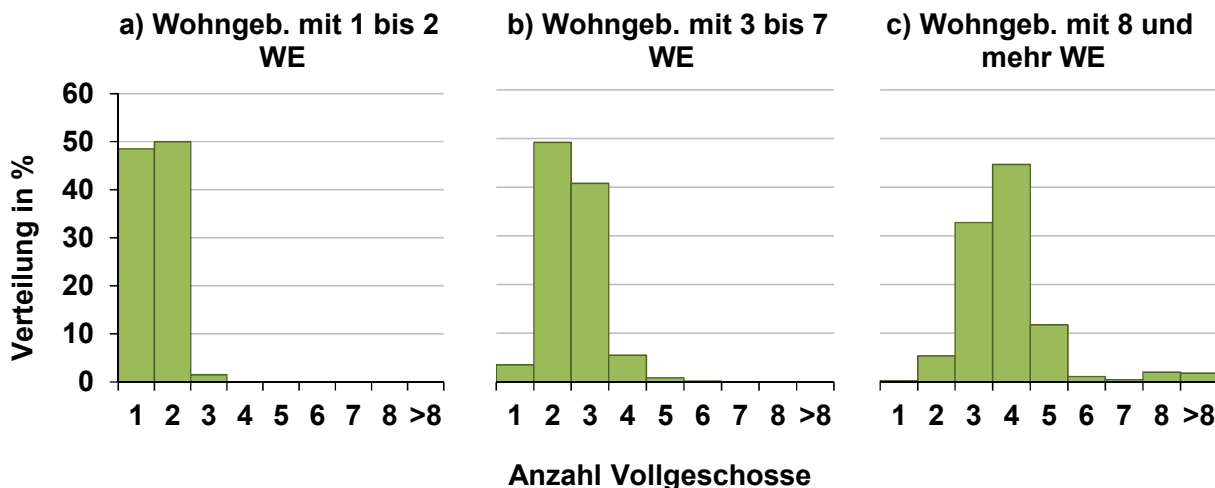
Die durchschnittliche Wohnungsanzahl [$\emptyset WE$] berechnet sich aus der Gesamtanzahl der Wohngebäude [n_{WG}] der betreffenden Gruppe und der Gesamtzahl an Wohnungen [n_{WE}] in dieser Gebäudegruppe. Die Berechnungen für mittlere Mehrfamilienhäuser (MMH) und große Mehrfamilienhäuser (GMH) erfolgt analog der Berechnung für kleine Mehrfamilienhäuser.

Anzahl der (Voll-)Geschosse

Die Anzahl der (Voll-)Geschosse [VG] gibt Auskunft darüber, über wie viele Ebenen sich die Wohnfläche eines Gebäudes verteilt. Die Geschossigkeit eines Gebäudes liefert weiterhin Anhaltspunkte, ob es sich bei dem Gebäude um ein kompaktes oder ein langgezo-

genes Gebäude handelt. Bei gleicher Wohn- bzw. Geschossfläche beeinflusst die Geschossigkeit darüber hinaus den Grad der Überbauung eines Grundstücks.

Je nach Typ, Gesamtfläche und Anzahl der Wohnungen besitzen Wohngebäude eine Anzahl an Geschossen, die i. d. R. im einstelligen Bereich liegt. Dies zeigt z. B. die Untersuchung von Loga, T. *et al.* (2005), in der rund 4.000 gebäudebezogene Daten ausgewertet wurden, die im Rahmen von Energieberatungsaktionen zu rund 5.500 Wohngebäuden erhoben wurden (Abb. 11).



Grafik: Norbert Krauß
Daten: Loga et al. 2005

Abb. 11: Anzahl der Vollgeschosse von Wohngebäuden in Abhängigkeit der Anzahl der Wohneinheiten.

Wie in Abb. 11 zu sehen ist, besitzen Wohngebäude mit bis zu zwei Wohneinheiten mehrheitlich ein oder zwei Geschosse. Nur in wenigen Fällen können es auch drei Geschosse sein. Bei Mehrfamilienhäusern mit bis zu sieben Wohneinheiten sind es mehrheitlich zwei oder drei Geschosse und in Mehrfamilienhäusern mit acht und mehr Wohneinheiten besitzt ein Großteil drei, vier und fünf Geschosse. Gebäude mit fünf und mehr Geschossen kommen in Deutschland lediglich in geringer Anzahl vor (vergleiche Abb. 11 c). Laut dem Institut für Wohnen und Umwelt (IWU) besitzen lediglich rund 8 % der Mehrfamilienhäuser fünf und mehr Geschosse (Loga, T. *et al.* 2011, S. 17). Insgesamt wird ersichtlich, dass mit der Anzahl der Wohnungen in einem Wohngebäude tendenziell auch die Anzahl der Geschosse steigt.

Gebäudegrundfläche

Die Grundfläche eines Gebäudes beziffert die Fläche, die durch das Gebäude überbaut ist. Nicht berücksichtigt werden hierbei Flächen von Balkonen, Terrassen und Freisitzen. Die Gebäudegrundfläche [GFl_{WG}] wird zur Berechnung des Bebauungsgrads und der Grundflächendichte (GRD) herangezogen. Besitzt ein Gebäude lediglich ein Vollgeschoss, so entspricht die Gebäudegrundfläche der Geschossfläche des Gebäudes (z. B.

Bungalows). Besitzt ein Gebäude hingegen mehr als ein Geschoss, dann sinkt, bei gleicher Geschossfläche, die Gebäudegrundfläche. Die Gebäudegrundfläche $[GF_{WG}]$ kann gemäß der folgenden Formel berechnet werden:

$$GF_{WG} = \frac{Wfl.* f_{GF}}{(n_{VG} + VG_{DG})} \quad [m^2] \quad \text{Formel [9]}$$

Geometrien der Gebäudevertreter

Die Mehrheit der Gebäude in Deutschland entspricht, sieht man einmal von den Dächern ab, in seiner Form einem Kubus, einem Quader oder einer Aneinanderreihung mehrerer Kuben und/oder Quader (z. B. Winkelhäuser, Hofhäuser). Liegen z. B. Informationen zur Geometrie (Breite, Tiefe und Höhe) der Baukörper vor, so können anhand dieser Informationen die darin befindlichen Flächen und Volumen in vereinfachter Weise berechnet werden. Liegen entsprechende Informationen hingegen nicht vor, so bedarf es Verfahren und Modelle, mit deren Hilfe diese Informationen z. B. aus digitalen Karten und/oder hochaufgelösten Luftaufnahmen generiert und/oder extrahiert werden können (Meinel, G. *et al.* 2008, Nytsch-Geusen, C. *et al.* 2016).

Da im Rahmen der vorliegenden Arbeit keine Auswertung digitaler Karten und hochaufgelöster Luftbilder vorgesehen war, wurde ein Berechnungsansatz erarbeitet, mit dessen Hilfe geometrischer Informationen für die Gebäudevertreter berechnet werden können. Zusätzlich zu den bereits vorliegenden Informationen zur Wohn- und Geschossfläche, der Geschossigkeit und Anzahl der Wohnungen werden Informationen zur Breite und Länge eines Gebäudes benötigt. Da es jedoch nach derzeitigem Kenntnisstand keine frei zugänglichen Datensammlungen zu Gebäudegeometrien gibt, wurden Angaben zur Abmessung von Gebäuden aus Gebäudebauplänen in einer Literatur- und Datenrecherche erhoben. Hierzu wurden Gebäudepläne aus der Fachliteratur (Achterberg, G. 1973, Voigt, H. 1973, Wirth, G. 1976, Achterberg, G. *et al.* 1984, Schulze, D. 1996, Prinz, D. 1999, Gruhler, K. *et al.* 2002) herangezogen. Die vorliegenden Studien enthalten mehrheitlich Informationen zu Gebäudedaten aus dem Zeitraum 1960 bis 1990. Eine zusätzliche Informations- und Datenquelle bildeten Immobilienportale (z. B. Immoscout24.de, Immonet.de), die in den Immobilieninseraten Informationen u. a. zu Wohnfläche, Baualter, Energieverbrauch bzw. Energiebedarf, Geschossigkeit und Grundstücksfläche enthalten. Vereinzelt sind den Immobilieninseraten auch Gebäudebaupläne, Grundrisse und Energieausweise beigefügt, die zusätzliche Informationen liefern.

Aus den zur Verfügung stehenden Gebäudeplänen wurden Angaben zur Breite und Länge von Wohngebäuden entnommen. Die Auswertung ergab, dass die Gebäudebreite und Gebäudetiefe von Ein- und Zweifamilienhäusern i. d. R. zwischen 5 und 20 m liegt. Mehrfamilienhäuser hingegen weisen mit etwa 9 bis 42 m eine größere Bandbreite auf. So

besitzen kleine Mehrfamilienhäuser, bezogen auf die Wohnfläche, etwa die Abmessungen von großen Ein-/Zweifamilienhäusern. Größere Mehrfamilienhäuser, wie z. B. Punkthochhäuser, besitzen hingegen Abmessungen von bis zu 40 m und mehr (Gruhler, K. *et al.* 2002). Aufgrund der Auswertungen wird für die Abmessungen von Mehrfamilienhäusern von 10 bis 25 m ausgegangen. Für die weiteren Betrachtungen wurde darüber hinaus davon ausgegangen, dass Wohngebäude eine einfache rechteckige Grundfläche besitzen. Daran schließt die Annahme an, dass bei Gebäuden mit einer gestreckten rechteckigen Grundfläche und einem geneigten Dach die längere Gebäudeseite parallel zum Dachfirst verläuft und die kurze Gebäudeseite unterhalb des Giebels liegt. Zur besseren Differenzierung und zum besseren Verständnis werden die beiden Begriffe Giebelseite und Firstseite eingeführt. Die Giebelseite ist diesbezüglich als die Seite des Gebäudes definiert, die bis unter den Giebel reicht [L_{GS}]. Die Firstseite hingegen bezeichnet die parallel zum Dachfirst verlaufende Seite des Gebäudes [L_{FS}] (Abb. 12).

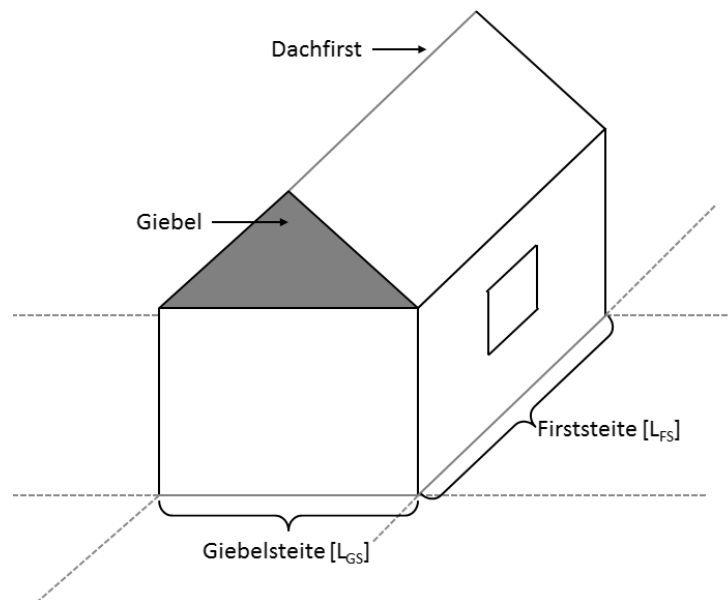


Abb. 12: Abmessungen und Parameter für die Gebäudevertreter.

Auf Basis der angenommenen rechteckigen Grundform der Gebäude ist es möglich, anhand der Gebäudegrundfläche und der Abmessung der Giebel- oder Firstseite, die jeweils andere Seite zu berechnen. Diesem Ansatz folgend, wird in Abhängigkeit des Gebäudevertreterers die Länge der Giebelseite für die einzelnen Berechnungen vorgegeben (siehe Tab. 9).

Tab. 9: Annahmen zur Länge der Giebelseite für verschiedene Gebäudekategorien.

Gebäudekategorie	Länge Giebelseite [in m]		
Ein- und Zweifamilienhäuser	8	10	12
Kleine Mehrfamilienhäuser	10	12	15
Mittlere Mehrfamilienhäuser	12	15	20
Große Mehrfamilienhäuser	15	20	25

Sind die Länge der Giebelseite [L_{GS}] und die Anzahl der Geschosse [n_G] bekannt, kann die Länge der Firstseite anhand der Formel [10] berechnet werden.

$$\text{Länge Firstseite } [L_{FS}] = \frac{BF}{L_{GS}} \quad [-] \quad \text{Formel [10]}$$

Dachform, Neigung, Ausrichtung und Fläche

In Deutschland gibt es eine große Vielfalt unterschiedlicher Dachformen. Dies sind z. B. Sattel-, Walm-, Mansard-, Spitz- und Pultdächer. Grob lassen sich die verschiedenen Dachformen in geneigte Dächer und Flachdächer unterteilen. Laut Diefenbach, N. *et al.* (2010) besitzen in Deutschland rund 91 % der Wohngebäude ein geneigtes Dach und lediglich 9 % ein Flachdach. Die in Deutschland verbreitetsten Dachformen mit geneigten Dachflächen sind Satteldächer (Schwarz, G. 1989, S. 96ff, Diefenbach, N. *et al.* 2010). Als geneigtes Dach werden alle Dächer mit einer Dachneigung von über 12° Grad bezeichnet. Informationen zur Dachneigung und Ausrichtung liegen derzeit jedoch trotz intensiver Forschung und vielfältiger Untersuchungen in Deutschland, z. B. für die Erstellung von Solarkataster, Gelände- und Stadtmodellen, nur punktuell und für einzelne Regionen vor. Die hieraus gewonnenen Daten zur Neigung und Ausrichtung sind jedoch nur in Ausnahmefällen frei zugänglich (Corradini, R. 2013). Zur Identifizierung der Dachausrichtung greift z. B. Corradini, R. *et al.* (2014) auf digitale Gebäudefußabdrücke aus Open-Street-Map-Daten zurück. Anhand eines Algorithmus ermittelt er die längste Gebäudedekante, die dann mit der Ausrichtung des Dachfirstes gleichgesetzt wurde, woraus sich die Ausrichtung der Dachflächen ableitet. Für die Dachneigung hingegen trifft Corradini, R. *et al.* (2014) ebenfalls Annahmen, da hierfür keine Daten vorlagen.

Für eine Untersuchung der Solarpotenziale von Siedlungen sind Kenntnisse zur Dachneigung und Ausrichtung jedoch von zentraler Bedeutung. Liegen entsprechende Daten nicht vor und können auch nicht mit vertretbarem Aufwand erhoben werden, müssen auf Basis der verfügbaren Informationen oder vergleichbarer Untersuchungen Annahmen getroffen werden. Für die Berechnungen der Gebäudegeometrien wurden daher stellvertretend für Satteldächer die Dachneigungen 25°Grad, 35°Grad, 45°Grad und 55°Grad berücksichtigt. Bei Flachdächern wird vereinfachend von einem Neigungswinkel von 0°Grad ausgegangen.

In Wohngebäuden werden neben den Vollgeschossen häufig auch Dachgeschosse für Wohnzwecke ausgebaut und bewohnt. Aufgrund konstruktiver Rahmenbedingungen, so z. B. der Dachneigung, kann i. d. R. nur ein Teil der Fläche im Dachgeschoss genutzt werden. Dies macht sich z. B. bei der Bemessung der Wohnfläche bemerkbar. So werden in Wohnungen mit Dachschrägen Grundflächen unter Dachschrägen nur anteilig als Wohnfläche anerkannt (WoFIV). Vergleichbares trifft auch auf die Geschossfläche zu.

Nach BauNVO bzw. der Bauverordnungen der einzelnen Länder, gehen nur Flächen von Geschossen in die Geschossflächenberechnung ein, die eine lichte Höhe von mindestens 2,3 m besitzen und sich auf einen Anteil von mindestens 60% der Gesamtfläche im Dachgeschoss erstreckt. Zur Berechnung der nutzbaren Geschossfläche in Dachgeschossen wird die nachfolgende Berechnungssystematik angewendet. Zunächst wird anhand der nachfolgenden Formel überprüft, ob das Dachgeschoss die Mindesthöhe [h_{DG}] von 2,3 m erreicht.

$$h_{DG} = \frac{L_{GS}}{2} * TAN(\alpha) \quad [-] \quad \text{Formel [11]}$$

Für die Berechnung der Geschosshöhe [h_{DG}] werden die Länge der Giebelseite [L_{GS}] sowie die Dachneigung [α] benötigt. Liegt die berechnete lichte Höhe am höchsten Punkt des Dachgeschosses unter der Mindesthöhe von 2,3 m, dann wird vorausgesetzt, dass im Dachgeschoss keine Wohnnutzung stattfindet. Somit wird auch keine Geschossfläche für das Dachgeschoss ausgewiesen. Beträgt die lichte Höhe jedoch mindestens 2,3 m, so wird geprüft, ob der Anteil der potenziellen Fläche 60 % und mehr beträgt. Hierzu wird die Formel [12] verwendet.

$$L_{Nutz.} = \frac{\left(L_{GS} - \left(2 * \left(\frac{2,3 \text{ m}}{TAN(\alpha)} \right) \right) \right)}{L_{GS}} \quad [-] \quad \text{Formel [12]}$$

Anhand der Formel [12] kann der Anteil von [L_{GS}] ermittelt werden, der die Mindesthöhe von 2,3 m erfüllt. Liegt das Ergebnis von [$L_{Nutz.}$] gleich oder über 0,6⁷, so wird eine Wohnnutzung unterstellt und die Geschossfläche des Dachgeschosses [GF_{DG}] wird bei der Bemessung des Gebäudevertreter und dessen Geometrie berücksichtigt. Mit zunehmender Dachneigung steigt der anrechenbare Geschossflächenanteil im Dachgeschoss. Auch durch das Anheben der Gebäudebreite, bei gleicher Dachneigung, steigt der anrechenbare Geschossflächenanteil im Dachgeschoss.

Dachfläche

Zur Ermittlung des solarenergetischen Potenzials einzelner Gebäudevertreter oder auch ganzer Wohnblöcke werden Informationen zur theoretisch verfügbaren Dachfläche [DF] benötigt. Anhand der zuvor dargelegten Berechnungsansätze kann die Dachfläche für die idealisierten Gebäudevertreter berechnet werden. Hierzu werden Angaben zur Dachart, Dachneigung, Giebel- und Firstseite benötigt. Diese können anhand der vorausgegangen

⁷ Aufgrund der Berechnungsformel können negative Werte resultieren.

Berechnungsformeln ermittelt werden. Im Rahmen der Arbeit werden die Dacharten Flachdach und symmetrisches Satteldach betrachtet. Diese repräsentieren die Mehrheit der in Deutschland anzutreffenden Dachformen.

Die Dachfläche $[DF]$ eines Flachdaches entspricht im Modell der Gebäudegrundfläche und wird gemäß der folgenden Formel berechnet.

$$DF_{Flach} = BF \text{ bzw. } \frac{GF}{VG} \quad [m^2] \quad \text{Formel [13]}$$

Für die Berechnung der Dachfläche des Satteldachs werden Informationen zu den Längenmaßen für Giebel- und Firstseite des Gebäudevertreters und die Neigung des Daches benötigt. Mittels der nachfolgenden Formel kann die Gesamtfläche des Daches berechnet werden.

$$DF_{Ges} = \left(\frac{L_{GS}}{\cos(\alpha)} \right) * L_{FS} \quad [m^2] \quad \text{Formel [14]}$$

Die anhand der Formel [10] Berechnete Fläche teilt sich in zwei gleichgroße Dachhälften $[DF_H]$ auf. Die Berechnung der Dachfläche $[DF]$ der beiden Dachhälften kann anhand der nachfolgenden Berechnungsformeln ermittelt werden.

$$DF_H = \frac{DF}{2} \quad [m^2] \quad \text{Formel [15]}$$

Baualter und Baualterklassen von Wohngebäuden

Das Baualter eines Gebäudes gibt Auskunft über den Zeitraum, in dem das Gebäude errichtet wurde. Anhand des Baualters können weitere Eigenschaften eines Gebäudes geschlussfolgert werden. Dies sind z. B. bauphysikalische und wärmetechnische Merkmale, die sich aufgrund der zum Zeitpunkt der Errichtung verbreiteten Wohnungsbautrends, gültiger Bauvorschriften, Normen sowie wirtschaftlicher Rahmenbedingungen eingrenzen lassen. Folglich kann zwischen dem Baualter eines Gebäudes und dessen theoretischem Heizwärmebedarf ein Zusammenhang hergeleitet werden, was durch mehrere Studien belegt werden kann (Loga, T. *et al.* 2011, Bauer, E. 2013, Aksoezen, M. *et al.* 2015).

Fehlen Daten zum Heizwärmeverbrauch, kann mit Hilfe des Baualters bzw. des Baujahrs der Heizwärmebedarf einzelner Gebäude oder auch ganzer Gebäudeblöcke abgeschätzt werden. Hierzu können beispielsweise Heizkennwerte aus Gebäudetypologien verwendet werden, wie sie z. B. das Institut für Wohnen und Umwelt erarbeitet hat (Loga, T. *et al.* 2011). Die darin angeführten Heizkennwerte sind einzelnen Gebäudetypen zugeordnet,

die stellvertretend für eine Gruppe von Gebäuden und eine zeitlich begrenzte Bauphase stehen. Diese Bauphasen, auch als Baualtersklassen bezeichnet, wurden auf der Basis von Bauvorschriften, Verordnungen und Informationen amtlicher Statistiken definiert (Loga, T. *et al.* 2011). Informationen zu den Baualtersklassen von Wohngebäuden können der amtlichen Statistik (Statistische Ämter des Bundes und der Länder 2011) entnommen werden.

Bauweise

Die Bauweise eines Wohngebäudes gibt an, ob es sich bei dem betreffenden Gebäude um ein freistehendes oder gereihtes, eine Doppelhaushälfte oder ein Gebäude einer davon abweichenden Bauweise handelt (Statistische Ämter des Bundes und der Länder 2014b). Die angeführten Bauweisen treffen auf Ein- und Mehrfamilienhäuser zu. Die hier angeführte Bauweise ist jedoch nicht gleichzusetzen mit der Bauweise aus der BauNVO § 22, die in offene, geschlossene und sonstige Bauweise differenziert (Heisel, J. P. 2013). Informationen zur Bauweise wurden im Rahmen des Zensus 2011 erhoben und ermöglichen eine erste grobe Zuordnung der Gebäude zu Bebauungsformen.

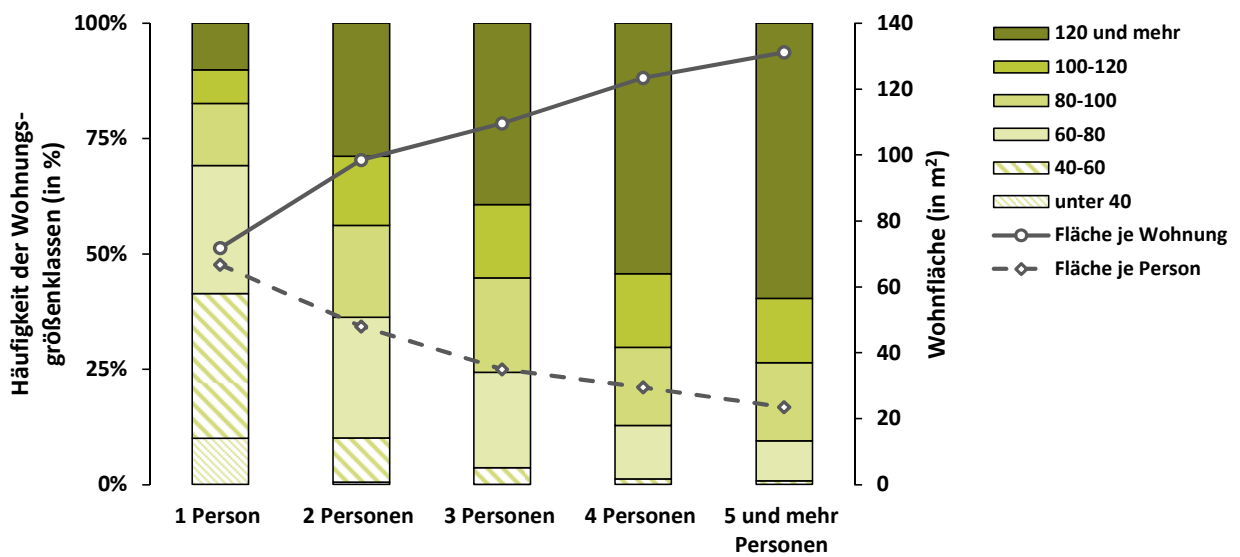
Wohnungs- und Gebäudebelegungsziffer

Die Wohnungsbelegung gibt Auskunft darüber, wie viele Personen in einer Wohnung leben bzw. diese nutzen. Dies hat beispielsweise Einfluss auf den Strom-, Brauchwarmwasser- und Heizwärmeverbrauch. Die Wohnungsbelegung ist daher ein wichtiger Parameter zur Berechnung der Energienachfrage.

Für die Berechnungen der Wohnungsbelegung wurde in der vorliegenden Arbeit auf Daten der amtlichen Statistik zu Haushaltsgröße, Wohnungs- und Gebäudebestand zurückgegriffen. Entsprechende Daten können online⁸ bis zur Gemeindeebene abgerufen oder bei den statistischen Ämtern angefragt werden (Statistische Ämter des Bundes und der Länder 2011).

Untersuchungen statistischer Daten zur Verteilung unterschiedlicher Größenklassen von Wohnungen nach der Haushaltsgröße zeigen (Abb. 13), dass die Haushaltsgröße mit der Größe der Wohnung (Wohnfläche) steigt. So leben Single-Haushalte in kleineren Wohnungen als Haushalte mit fünf und mehr Personen. Im aufgezeigten Beispiel beträgt die durchschnittliche Wohnungsgröße bei Single-Haushalten rund 65 m² und für einen Haushalt mit fünf und mehr Personen rund 130 m². Somit steigt mit jedem weiteren Haushaltsmitglied die Wohnfläche der Wohnung. Aufgrund des sich reduzierenden Wohnflächenzuwachses sinkt hingegen die durchschnittliche Wohnfläche je Haushaltsmitglied (Abb. 13).

⁸ Daten zum Wohnungs- und Wohngebäudebestand unter https://ergebnisse.zensus2011.de_abrufbar.



Grafik: Norbert Krauß
 Daten: Statistisches Bundesamt, Fachserie 5, Heft 1, 2014

Abb. 13: Anteile von Haushalten nach der Anzahl der Personen und der Größe der Wohnung (in m²)

Dieser Zusammenhang ist dahingehend von Bedeutung, dass sich Unterschiede in der Aufteilung der Wohnungsgrößenzusammensetzung und der Zuordnung der Haushaltsgrößen auf die durchschnittliche Wohnungsgröße niederschlagen. Dies hat wiederum Einfluss auf die Belegungszahl. Hierdurch werden Unterschiede in den Untersuchungsgebieten berücksichtigt, was sich auf den Strom- und Warmwasserbedarf niederschlägt (vergleiche Kapitel 4.2 und 4.3). Zur Berechnung der durchschnittlichen Belegungszahl der einzelnen Gebäudevertreter kann wie folgt vorgegangen werden.

Tab. 10: Beispielhafte Gliederung der Haushalte nach Haushaltsgröße, Wohnungsgrößenklassen und Anzahl der Wohnungen in Wohngebäuden

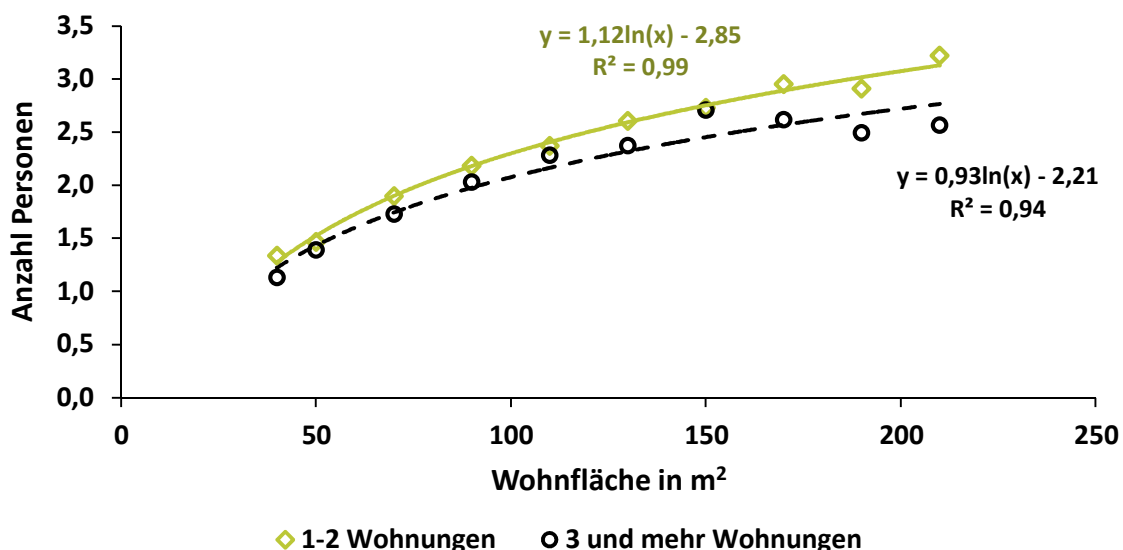
Anzahl der Wohnungen	Klassen	Insgesamt	Personen					
			1	2	3	4	5	6+
1-2 Wohnungen	Insgesamt							
	Unter 40							
	40 - 59							
	60 - 79							
	80 - 99							
	100 - 119							
	120 - 139							
	140 - 159							
	160 - 179							
	180 - 199							
	200 und mehr							

Zunächst werden aus der Zensus-Datenbank die Anzahl der Personen für die Wohnungsgrößenklassen (Unter 40, 40-59, 60-79, usw.) differenziert nach Wohngebäude mit einer und zwei Wohnungen sowie Wohngebäude mit drei und mehr Wohnungen ent-

nommen (Tab. 10). Im Anschluss daran wird für jede Wohnungsgrößenklasse die gewichtete Haushaltsgröße ermittelt. Hierzu werden die Haushalte mit der Anzahl der Personen im Haushalt (Haushaltsgröße) multipliziert und durch die Gesamtzahl der Haushalte in der entsprechenden Wohnungsgrößenklasse dividiert. Zur Trendanalyse werden den Wohnungsgrößenklassen die in Tab. 11 abgetragenen mittleren Wohnflächen zugeordnet. Nun können die ermittelten Personenzahlen je Wohnungsgrößenklasse zusammen mit den Setzungen der Wohnungsgrößen in einer Punkt-Wolken-Grafik dargestellt werden. Unter Zuhilfenahme der Trendfunktion in Excel können Formeln abgeleitet werden, mit deren Hilfe die Anzahl der Personen je Wohnung in Abhängigkeit der Wohnfläche berechnet werden können.

Tab. 11: Setzungen der Wohnungsgrößen (in m²) für die Wohnungsgrößenklassen

Wohnungsgrößenklasse	Setzung in m ²
Unter 40	40
40 - 59	50
60 - 79	70
80 - 99	90
100 - 119	110
120 - 139	130
140 - 159	150
160 - 179	170
180 - 199	190
200 und mehr	210



Grafik: Norbert Krauß

Daten: Statistische Ämter des Bundes und der Länder, 2014

Abb. 14: Anzahl Personen je Wohnung in Abhängigkeit der Wohnfläche, differenziert nach Wohngebäuden mit 1-2 und 3 und mehr Wohnungen

3.2.3 Herleitung der Gebäudevertreter

Zur Herleitung der Gebäudevertreter auf der Gemeindeebene wird auf die zuvor vorgestellten Berechnungsansätze und Datengrundlagen zurückgegriffen. Liegen die zuvor benannten Daten für die betreffende Gemeinde bzw. für das Untersuchungsgebiet vor, wird wie nachfolgend schematisch beschrieben vorgegangen:

1. Wohn-, Geschossfläche und Wohneinheiten
 - a. Zunächst werden in einem ersten Schritt differenziert nach Gebäudetyp [EFH; MFH], Anzahl der Wohneinheiten [1-2; 3-6; 7-12; >12 WE] und Bauweise [freistehend; gereiht] die durchschnittliche Wohnfläche und durchschnittliche Anzahl an Wohnungen je Gebäude berechnet.
 - b. In einem zweiten Schritt werden ausgehend von der durchschnittlichen Wohnfläche die durchschnittliche Geschossfläche [GFI] je Gebäude berechnet. Dies erfolgt mittels des Geschossflächen-Faktors [f_{GFI}].
2. Geometrien, Dachfläche und bebaute Fläche
 - c. Nachdem zuvor die durchschnittlichen Wohn- und Geschossflächen sowie die durchschnittliche Anzahl an Wohneinheiten berechnet wurden, werden im Anschluss daran die Geometrien [Länge Giebelseite] ermittelt. Hierzu ist für jedes der folgenden Merkmale aus den Optionen eine Auswahl zu treffen:
 - Dachform [Schrägdach; Flachdach],
 - Dachneigung [0; 25; 35; 45; 55] und
 - Länge von Giebelseite [EFH: 8; 10; 12; MFH: 10; 12; 15; 20; 25]
 - Anzahl Vollgeschosse [1-6].
 - d. Auf Grundlage der getroffenen Auswahl (Dachform, Dachneigung, Länge Giebelseite) erfolgt die Berechnung der Geschosshöhe des Dachgeschosses (vgl. S. 54). Mit Hilfe der Dachgeschosshöhe wird der Vollgeschossfaktor [VG_{DG}] des Dachgeschosses bestimmt (vgl. S. 54). Hierbei sind die Mindesthöhe und der Mindestflächenanteil des Dachgeschosses zu berücksichtigen.
 - e. Im Anschluss wird die bebaute Fläche je Gebäude, gemäß der Formel [9] (vgl. S. 51), berechnet. Hieran schließt die Berechnung der noch fehlenden Firstseite an. Hierzu wird die bebaute Fläche [BF] durch die Länge der Giebelseite geteilt (vgl. S. 53).
 - f. Abschließend wird die Dachfläche [DF], gemäß der Formel [14] berechnet.

4 Energiebedarfsmodell

Ziel des im vorliegenden Abschnitt beschriebenen Energiebedarfsmodells ist es, den Energiebedarf in einem räumlich abgegrenzten Gebiet, dies kann ein Quartier, eine Gemeinde oder auch eine Region sein, zu berechnen und dessen zeitabhängige Nachfrage zu modellieren (vergleiche Abb. 15). Untersucht werden hierbei der Heizwärmebedarf von Wohngebäuden, der Energiebedarf für Warmwasser und der Bedarf an Haushaltsstrom. In Abhängigkeit des Bezugsgebietes werden hierdurch 20-90 % des Energiebedarfs (ohne Verkehr) abgedeckt. Beeinflusst wird dies durch die Bedeutung und Art der ansässigen Industrie sowie der Bereiche Gewerbe, Handel und Dienstleistungen (GHD-Sektor) im Bezugsgebiet. Durch einen hohen Anteil industrieller und gewerblicher Betriebe im Bezugsgebiet reduziert sich die energetische Bedeutung des Bereichs Wohnen. Die Mehrheit der kleineren und mittleren Städte (10 Tsd. Bis 100 Tsd. Einwohner) werden jedoch i. d. R. durch die Bereiche Wohnen und Haushalte dominiert.

Der Energiekonsum der privaten Haushalte für die Beheizung, die Bereitstellung von Warmwasser und den Betrieb von Haushaltsgeräten wird durch eine Vielzahl an Parametern beeinflusst. Hierzu gehören u. a. physische Parameter, wie die beheizte Wohnfläche, der energetische Gebäudestandard, die Ausstattung der Haushalte mit Haushaltsgeräten und die Haushaltsgröße sowie sozioökonomische Parameter, wie das Alter der Bewohner/innen, Lebensstil, Einkommen und Wertevorstellungen. Der Einfluss der einzelnen physischen und sozioökonomischen Parameter auf die drei Anwendungsbereiche ist jedoch unterschiedlich stark ausgeprägt. Eine Vielzahl an Studien geben Aufschluss über den Einfluss physisch-technischer und sozioökonomischer Parameter auf den Energieverbrauch bzw. Energiebedarf. Auf Basis entsprechender Studien werden für die Berechnung der anwendungsbezogenen Energiebedarfe zentrale Parameter für die jeweiligen Anwendungsbereiche identifiziert. Neben dem Einfluss einzelner Parameter ist hierbei auch die Datenlage und Datenverfügbarkeit dieser zu berücksichtigen. Aufbauend auf den Parametern wird für jeden Anwendungsbereich ein spezifischer Berechnungsansatz und spezifische Energiekennwerte erarbeitet. Hierzu werden Bezugsgrößen, z. B. Wohnfläche, Personen, Liter, usw., definiert. Aufgrund der unterschiedlichen Verfügbarkeit von Daten und deren Struktur sind für jeden Energieanwendungsbereich separate Bezugsgrößen zu definieren.

Neben dem Energiebedarf der privaten Haushalte beeinflusst dessen zeitlicher Verlauf in erheblichem Maße die Deckung des Energiebedarfs durch fluktuierende regenerative Energien. Der zeitabhängige Energiebedarf wird u. a. durch das Nutzer- und Nutzerverhalten, Nutzungsrhythmen, tages- und jahreszeitliche Rahmenbedingungen, Witterungsbedingungen und sozioökonomische Parameter beeinflusst.

Zur Herstellung eines raumspezifischen Bezugs werden die spezifischen Energiekennwerte mit raum- und siedlungsbezogenen sowie soziostrukturellen Daten aus dem Siedlungsmodell (Kapitel 5) verknüpft. Durch die Verknüpfung mit raumbezogenen Daten können regionale Unterschiede, die sich auf den Energiebedarf auswirken, berücksichtigt werden.

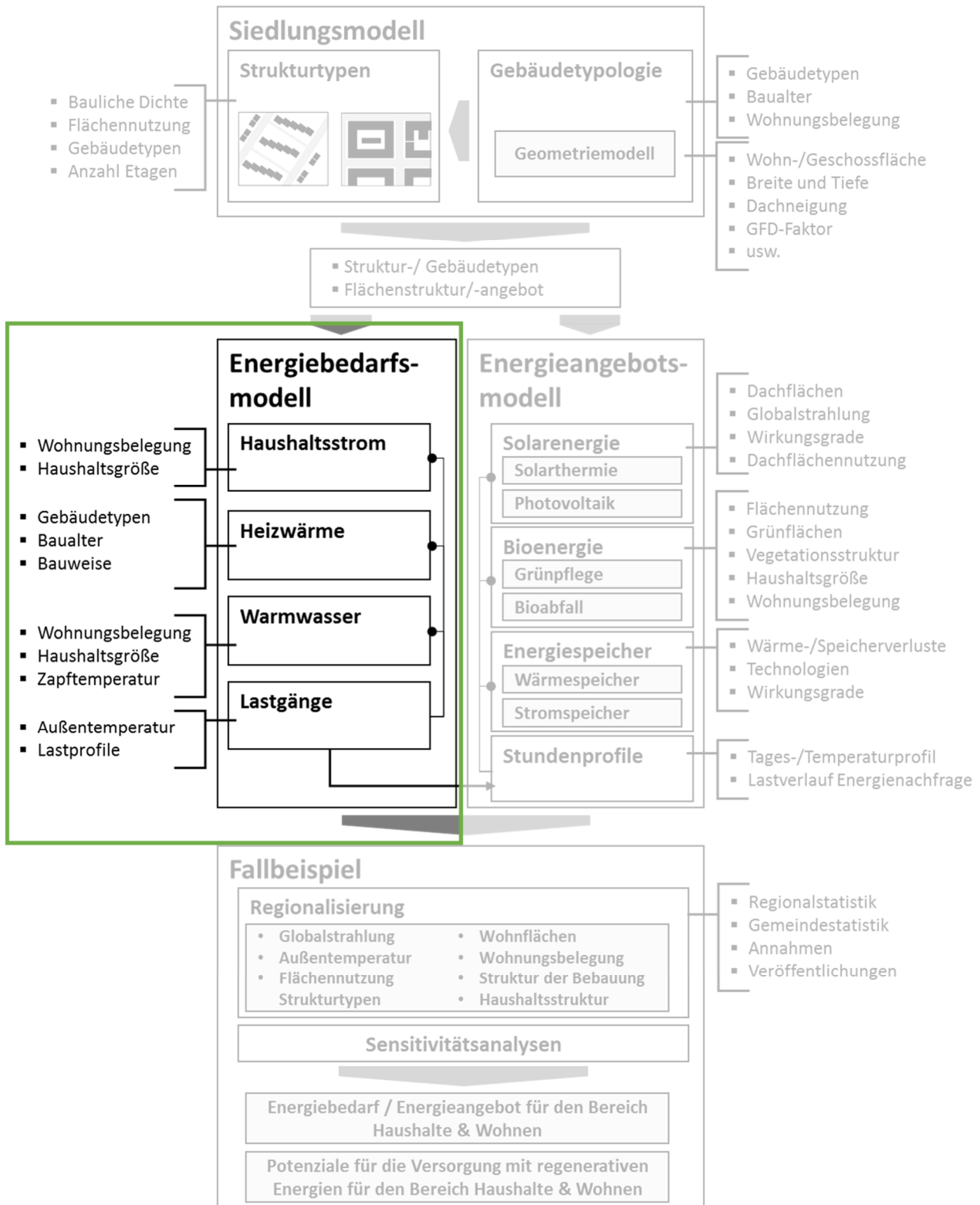
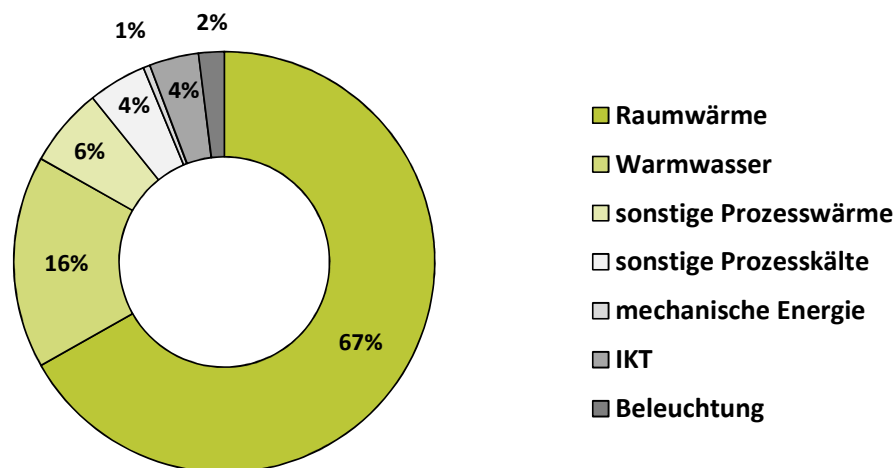


Abb. 15: Modellstruktur – Fokus Energiebedarfsmodell (Eigene Darstellung)

In den nachfolgenden Absätzen wird für jeden der drei Anwendungsbereiche (Heizwärme, Warmwasser und Haushaltsstrom) zunächst der Stand des Wissens, die Berechnungsansätze und auf die Integration im Modell eingegangen. In Kapitel 4.1 wird zunächst der Heizwärmebedarf von Wohngebäuden beschrieben. Im Anschluss folgen die Bereiche Warmwasser (Kapitel 4.2) und dann Haushaltsstrom (Kapitel 4.3).

4.1 Heizwärmebedarf privater Haushalte

Rund 67 % des Energieverbrauchs privater Haushalte (ohne Verkehr) in Deutschland wird für die Bereitstellung von Raumwärme aufgewendet (BMWi 2017). Aufgrund dessen kommt dem Energieverbrauch für Raumwärme auch eine zentrale Bedeutung zu, wenn es darum geht, zukünftig eine weitestgehend auf regenerativen Energien beruhende Energieversorgung zu erreichen. Um die Versorgung mit Raumwärme zukünftig umweltverträglich zu gestalten werden zwei Ansätze verfolgt.



Grafik: Norbert Krauß
Daten: BMWi 2017

Abb. 16: Einsatz von Endenergie nach Anwendungsbereichen privater Haushalte

In einem ersten Schritt soll der Energieaufwand durch eine Steigerung der energetischen Qualität des Gebäudebestands verringert und der verbleibende Energieaufwand im Anschluss durch eine regenerative Energiebereitstellung gedeckt werden. Ob der erforderliche Energieaufwand durch das regenerative Energiepotenzial gedeckt werden kann, hängt vom Energiebedarf und dem regenerativen Energiepotenzial ab. Beide, Energieaufwand und Energiepotenzial werden durch vielfältige, insbesondere standortabhängige, Parameter beeinflusst.

Zur Abschätzung des Beitrags regenerativer Energien zur Bereitstellung von Raumwärme in Städten ist zunächst der derzeitige Energieaufwand für die Bereitstellung der Raumwärme im Wohnungsbestand zu ermitteln. Liegen keine real erfassten Energieverbräuche für den Untersuchungsraum vor, so ist der Energiebedarf unter Zuhilfenahme von Berechnungsverfahren abzuschätzen. Hierzu liegt eine breite Auswahl an Verfahren

zur Berechnung des Energiebedarfs für Raumwärme vor. Auf diese wird nachfolgend kurz eingegangen.

4.1.1 Verfahren zur Berechnung des Heizwärmebedarfs auf städtischer bzw. teilstädtischer Ebene

Für die Berechnung des Heizwärmebedarfs einzelner Straßengevierte, Quartiere oder ganzer Siedlungen wurde in den letzten Jahrzehnten eine Vielzahl an Verfahren und Softwarelösungen erarbeitet. Hierzu gehören z. B. die Arbeiten von Roth, U. *et al.* (1984), Blesl, M. (2002), Internationale Bauausstellung IBA Hamburg (Hrsg.) (2010), Hegger, M. *et al.* (2012) und Kaden, R. (2014). Die Verfahren und Softwarelösungen unterscheiden sich teils erheblich in ihren Forschungsfragen, Zielstellungen, Wahl der verwendeten Werkzeuge, dem Detaillierungsgrad und den abgeleiteten Untersuchungsergebnissen. Allen Verfahren gemein ist jedoch, die hohe Komplexität des Untersuchungsgegenstands sowie die begrenzte Datenverfügbarkeit, insbesondere wenn es um die Untersuchung spezifischer Bezugsräume geht. Informationen zum Gebäudebestand können bis hinab zur Ebene der Gemeinden amtlicher Statistiken entnommen werden (DESTATIS 2008, 2012, Landesamt für Statistik Niedersachsen 2015, DESTATIS 2016). Informationen zur energetischen Qualität des Gebäudebestands hingegen liegen mehrheitlich nur auf nationaler und Landesebene aus Studien vor (Diefenbach, N. *et al.* 2010, Loga, T. *et al.* 2011, Walberg, D. *et al.* 2011, Loga, T. *et al.* 2012). Unterhalb dieser Ebenen wiederum, liegen lediglich für ausgewählte Fallstudiengebiete Untersuchungsergebnisse (Habermann-Nieße, K. *et al.* 2013, Walberg, D. *et al.* 2013) vor. Einflüsse, wie regionale Baumaterialien und Bauweisen aber insbesondere die Sanierungstätigkeiten an den Bestandsbauten können somit nicht oder nur unzureichend berücksichtigt werden. Hier sind u. a. in den letzten Jahren, im Zuge der Einführung des KfW-Programms „432 Energetische Stadtsanierung – Quartierskonzepte“, eine Vielzahl an Untersuchungen auf der Quartiersebene durchgeführt worden (z.B. Habermann-Nieße, K. *et al.* 2013, Ecofys *et al.* 2014, Stein, B. *et al.* 2014). Vielfach werden für die Quartierskonzepte jedoch auch auf Daten übergeordneter Ebenen und Annahmen zurückgegriffen, so dass auch hier nur teilweise Primärdaten erhoben werden.

Um diesem Informations- bzw. Datenmangel und der hohen Komplexität zu begegnen, werden zur energetischen Untersuchung bereits vorliegende empirische Vergleichsdaten herangezogen oder Abstraktionen des Untersuchungsgegenstandes, so z. B. durch Typisierungen und Klassifizierungen von Gebäuden, vorgenommen (Hegger, M. *et al.* 2012, Nytsch-Geusen, C. *et al.* 2016). Häufig werden beide Ansätze in unterschiedlicher Gewichtung kombiniert.

Zum einen können spezifische Energiekennwerte, die auf Basis empirischer Erhebungen von Energieverbräuchen in Wohngebäuden beruhen, herangezogen werden (Greller, M. *et al.* 2010, Schröder, F. *et al.* 2011, Michelsen, C. *et al.* 2014, Michelsen, C. 2015,

2016). Neben der vergleichsweise einfachen Anwendung ist jedoch z. B. die Repräsentativität der Daten und die Anschlussfähigkeit (Bezugsfläche) sowie die verwendete Datensystematik, zu berücksichtigen. Darüber hinaus liegen i. d. R. keine oder nur wenige ergänzende Informationen zu den gemessenen Energieverbrauchskennwerten vor. So ist z. B. unbekannt, welchen Sanierungsstand das Gebäude besitzt, wie viele Bewohner/innen darin wohnen oder welchen Lebensstil diese führen. Infolgedessen ist es schwierig abzuschätzen, wie gut die zugrunde liegenden Daten den zu betrachtenden Gebäudebestand wiedergeben. Verfahren, wie das zuvor beschriebene wurden z. B. von Arge e.V. (2009), Schröder, F. *et al.* (2009), Greller, M. *et al.* (2010), Michelsen, C. & Müller-Michelsen, S. (2010), Schröder, F. *et al.* (2011) und Frondel, M. & Ritter, N. (2012) verwendet.

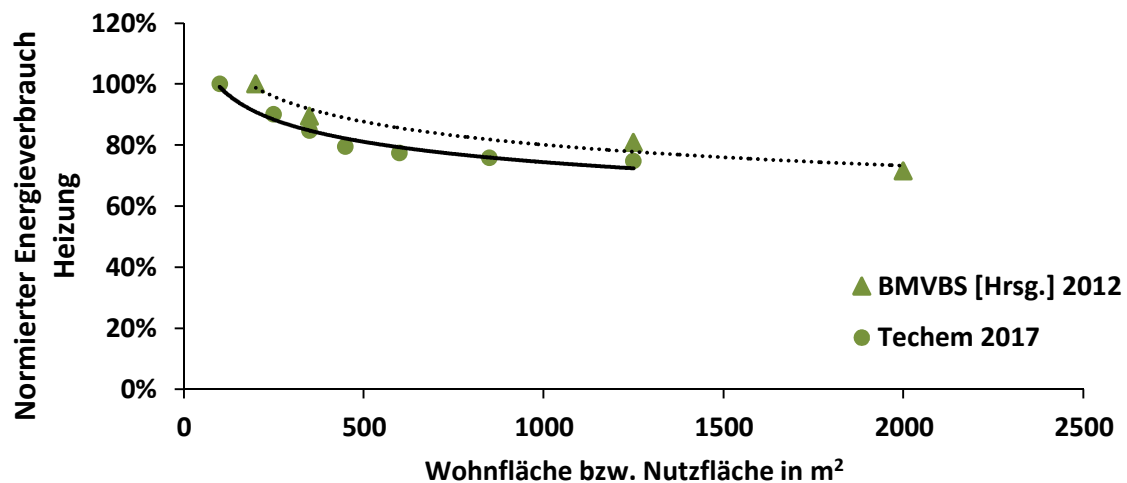
Weit verbreitet ist zum anderen die Berechnung des Energiebedarfs von Gebäuden anhand physischer (Bauteilflächen und -stärke) und energetischer Charakteristiken (U-Werte) (Diefenbach, N. *et al.* 2010, Loga, T. *et al.* 2011, Loga, T. *et al.* 2012). Voraussetzung entsprechender Berechnungen sind Informationen zu den physischen und energetischen Charakteristika des Gebäudebestands. Sind diese für den Betrachtungsraum nicht verfügbar bzw. vorhanden, dann können Daten übergeordneter Bezugsräume oder aus vergleichbaren Untersuchungen herangezogen werden. Insgesamt sind mit diesem Ansatz umfangreiche Berechnungen verbunden, deren Qualität stark von den Eingangsdaten und den hinterlegten Berechnungsalgorithmen abhängen. Alternativ können aber auch Bedarfskennwerte aus vorausgegangenen Studien verwendet werden. Entsprechende Energiekennwerte können z. B. der Deutschen Gebäudetypologie des Instituts für Wohnen und Umwelt (Loga, T. *et al.* 2015), den Berechnungen von Beispielgebäuden für Rheinland-Pfalz (Heinrich, H. *et al.* 2006) oder Bayern (Hinz, E. 2006) entnommen werden.

4.1.2 Energiekennwerte

Um die Lücke der fehlenden Energiekennwerte zu schließen wird in Anlehnung an Seefeldt, F. *et al.* (2012) und Kemmler, A. *et al.* (2017) ein Verfahren abgeleitet, mit dessen Hilfe spezifische Energiekennwerte ermittelt werden. Wie in den Studien von Seefeldt, F. *et al.* (2012) und Kemmler, A. *et al.* (2017) aufgezeigt wurde, können aus der Literatur mehrere Zusammenhänge und Parameter identifiziert werden, die Einfluss auf den Energieverbrauch ausüben.

Größenabhängiger Heizenergieverbrauch

So zeigen Untersuchungen von (Techem GmbH 2010, Schröder, F. *et al.* 2011, BMVBS [Hrsg.] 2012, Techem GmbH 2016, 2017) dass mit steigender Wohnfläche der spezifische Heizwärmeverbrauch tendenziell sinkt (Abb. 17). Eine mögliche Ursache hierfür ist das bessere Hüllflächen-Volumen-Verhältnis (A/V-Verhältnis) bei größeren Gebäuden.

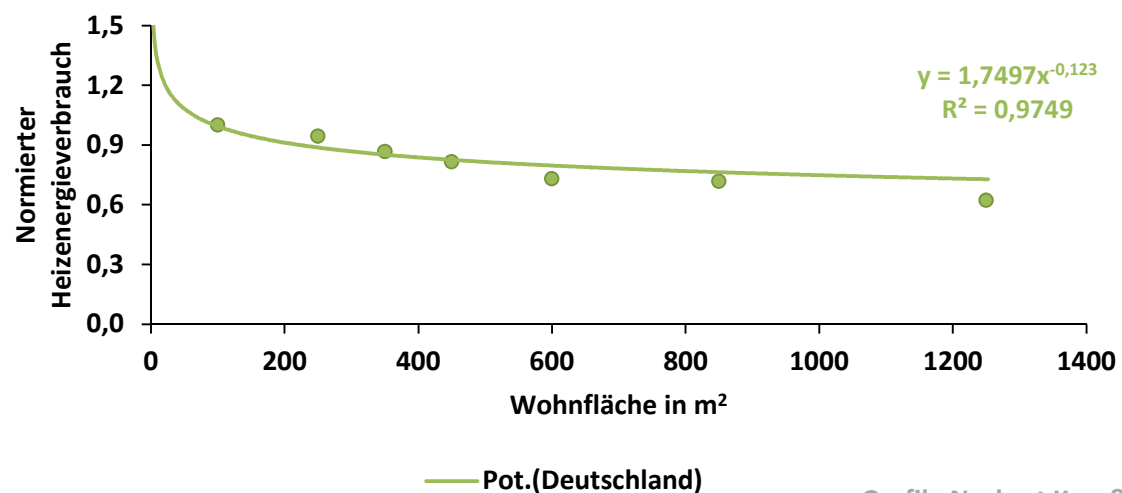


Grafik: Norbert Krauß

Quelle: BMVBS [Hrsg.] 2012; Techem 2017

Abb. 17: Normierter Energieverbrauch für Heizung in Abhängigkeit der Wohnfläche.

In Anlehnung an Seefeldt, F. *et al.* (2012) und Kemmler, A. *et al.* (2017) kann aus den Veröffentlichungen der Techem GmbH (2010, 2016, 2017) in Abhängigkeit der Wohnungsanzahl ein größenabhängiger Faktor $[f_{nWE}]$ ermittelt werden. Hierzu wird für jede Gebäudegröße (Anzahl Wohneinheiten) die mittlere Wohnfläche bestimmt. Weiterhin werden aus den Heizkennwerten (Techem GmbH 2010, 2016, 2017) eine Potenzfunktion abgeleitet. Durch Einsetzen der mittleren Wohnfläche in die Potenzfunktion kann $[f_{nWE}]$ ermittelt werden.



Grafik: Norbert Krauß

Abb. 18: Potenzfunktion zur Bestimmung des größenabhängigen Faktors $[f_{nWE}]$

Wohngebäude mit 1-2 Wohnungen bilden für die weiteren Berechnungen die Ausgangsbasis. Hierzu wird ihr $[f_{nWE}]$ gleich 1 gesetzt (Tab. 12).

Tab. 12: Größenabhängige Faktoren zur Anpassung der Heizenergiekennwerte

Wohngebäudetyp	EFH (1 WE)	ZFH (2 WE)	KMH (3-6 WE)	MMH (7-12 WE)	GMH (>13 WE)
Eigene Berechnungen	1,0	0,95	0,85	0,76	0,74
Kemmler, A. <i>et al.</i> (2017)	1,0	0,88	0,77	0,69	0,64/0,63

Wie bei Kemmler, A. *et al.* (2017) ergibt sich für die größenabhängige Heizenergiefaktoren eine vergleichbarer Kurvenverlauf. Anders als bei Kemmler, A. *et al.* (2017) fällt die ermittelte Kurve flacher ab. Der Unterschied zwischen den einzelnen Wohngebäudetypen ist jedoch vergleichbar mit denen von Kemmler, A. *et al.* (2017).

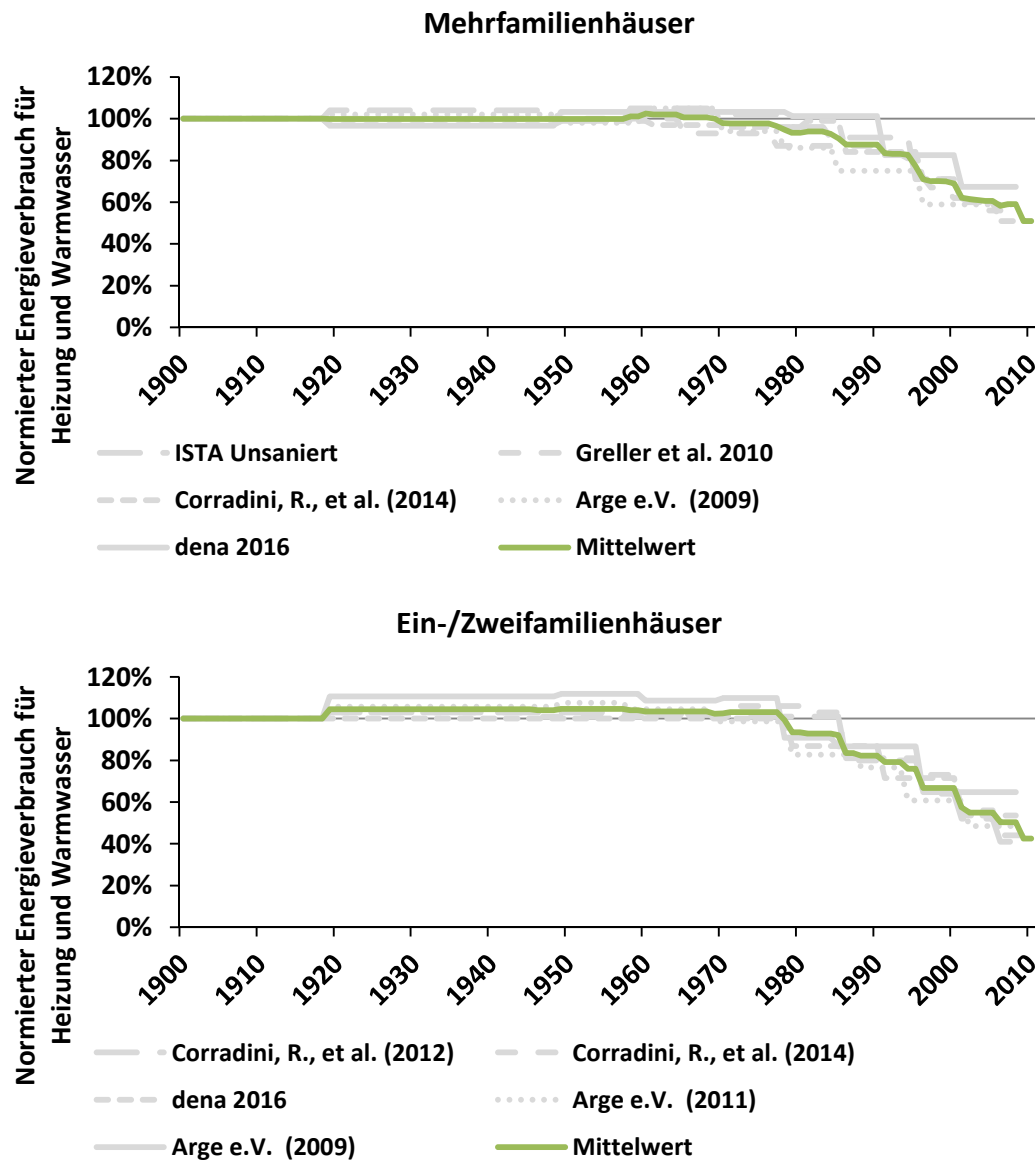
Einfluss des Baualters auf den Heizenergieverbrauch

Weiterhin zeigt sich (Frondele, M. & Ritter, N. 2010, Greller, M. *et al.* 2010, Walberg, D. *et al.* 2011, Diefenbach, N. 2013), dass der spezifische Heizwärmeverbrauch von Neubauten seit Ende der 1970er Jahre kontinuierlich gesunken ist (Abb. 19).

Verantwortlich hierfür ist die Einführung von energetischen Standards und Mindestanforderungen im Baubereich (z. B. Wärmeschutzverordnung, Energieeinsparverordnung). Durch das Auftragen normierter Energiekennwerte entlang der Jahre, gemäß den Studien zugrundeliegenden Baualtersklassen, kann die Entwicklung des Energieverbrauchs über die Jahre dargestellt werden. Als Referenzgröße wurde der durchschnittliche Wärmeverbrauch bzw. Wärmebedarf des Ein- und Mehrfamilienhausbestands angesetzt. Hierzu wurden baualtersklassenbezogene Kennwerte aus Walberg, D. *et al.* (2011) und Bigalke, U. *et al.* (2016) mit dem durchschnittlichen Energieaufwand in Verhältnis zueinander gesetzt. Die Kennwerte wurden im Anschluss, gemäß definierter BAK, für die Zeiträume gemittelt. Abschließend wurden gemäß der, für die Arbeit angesetzten Baualtersklassen, die gemittelten Jahre zusammengefasst (Tab. 13).

Bauweise und deren Einfluss auf den Heizenergieverbrauch

Wie bereits in Kapitel 3.2 dargelegt, beschreibt die Bauweise, ob es sich bei dem betreffenden Gebäude um ein freistehendes Gebäude, eine Doppelhaushälfte oder ein Gebäude in gereihter Formation (Reihenhaus) handelt. Aus energetischer Sicht ist die Bauweise dahingehend zu berücksichtigen, da bei Doppelhäusern und Häusern in gereihter Formation die wärmeübertragende Hüllfläche, gegenüber einer freistehenden Bauweise, reduziert wird. Infolgedessen sinkt die benötigte Nutzwärme zur Aufrechterhaltung der Innentemperatur. Erklärt wird dieser Effekt durch das veränderte Außenwand-Volumen-Verhältnis (A/V-Verhältnis).



Grafik: Norbert Krauß

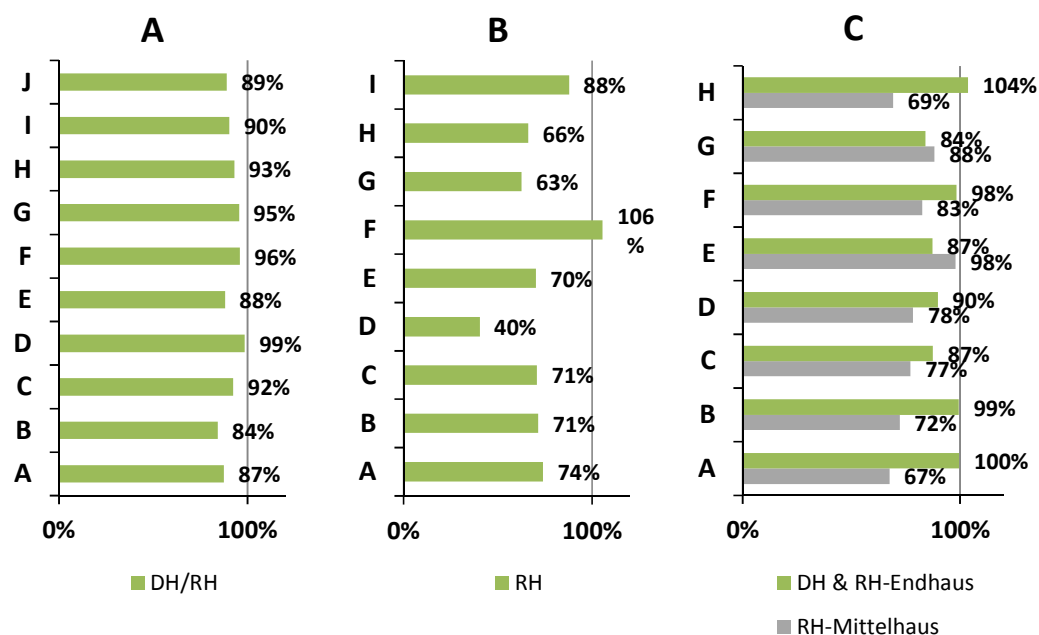
Abb. 19: Normierter Energieverbrauch in Abhängigkeit des Bauzeitraums für Ein- und Mehrfamilienhäuser

Tab. 13: Baualtersklassenabhängige Entwicklung der Heizenergieverbräuche im Wohngebäudebestand

BAK	Bis 1918	1919-1948	1949-1978	1979-1995	1996-2000	2001-2010	Durchschnitt
Mehrfamilienhäuser	105%	105%	106%	93%	82%	69%	100%
Ein-/Zweifamilienhäuser	111%	114%	112%	89%	73%	57%	100%

Studien von Lylykangas, K. (2009) und Danielski, I. *et al.* (2012) sowie Veröffentlichungen von Schulze Darup, B. (2009) und Lintner, S. *et al.* (2010) verweisen auf den Einfluss des A/V-Verhältnisses auf den Heizenergieaufwand. Unter sonst gleichen Verhältnissen führt eine Verringerung der Hüllfläche zu einem verringerten Heizenergieaufwand.

Eine Gegenüberstellung des Energieverbrauchs bzw. Bedarfs von Reihenhäusern und freistehenden Einfamilienhäusern aus Arge e.V. (2009), Corradini, R. (2013) und Loga, T. *et al.* (2015) bestätigen ebenfalls den Einfluss des A/V-Verhältnisses auf den Nutzenergieaufwand (Abb. 20). So liegt der Nutzenergieaufwand für die Beheizung bei Doppelhaushälften und Reihenendhäusern im Durchschnitt rund 5 % und bei Reihenmittelhäusern im Durchschnitt rund 20 % (Arge e.V. 2009) bzw. 30 % (Loga, T. *et al.* 2015) unter dem von freistehenden Einfamilienhäusern. Nicht hervorgeht aus den Studien, ob die Einsparungen u. a. auch durch unterschiedliche Sanierungsstände hervorgerufen werden.



Grafik: Norbert Krauß

Quelle: A) Corradini, R. (2013), B) Loga et al. (2015), C) Arge e.V. (2009)

Abb. 20: Heizenergieverbrauch von Doppel- und Reihenendhäusern sowie Reihenmittelhäusern im Verhältnis zum Heizenergieverbrauch von freistehenden Einfamilienhäusern nach Altersklassen (A-J; A-I und A-H)

Insgesamt zeigt sich, dass trotz gewisser Unsicherheiten, ein optimiertes A/V-Verhältnis infolge der Bauweise zu Einsparungen beim Heizenergieaufwand führt. Zur Berücksichtigung der Energieeinsparungen kompakter Wohngebäude wird im Modell der Faktor $[f_{BAU}]$ eingeführt. Wie zuvor dargelegt liegen die Einsparungen zwischen 5 % und 30 %, je nach Gebäudetyp.

Zu berücksichtigen ist hierbei aber auch, die Häufigkeit einzelner Gebäudetypen im Bestand. Dies bedeutet, dass der Heizenergieverbrauch des Bestands umso niedriger ist desto mehr Gebäude in einer kompakteren Bauweise ausgeführt wurden. In Deutschland befinden sich laut Zensus 2011 rund 55 % der Wohnungen in gereihten Wohngebäuden und Doppelhaushälften des Mehrfamilienhausbestands. Dies ist bei den Berechnungen im Modell durch eine verringerte Energieeinsparung für kompaktere Gebäude (Doppel-

haushälfte und Reihenhäuser) und einem Mehrverbrauch von freistehenden Gebäuden gegenüber dem mittleren Heizenergiekennwert zu berücksichtigen.

Nutzwärme

Bei den zuvor dargelegten Kennwerten handelt es sich um Endenergieverbräuche für die Beheizung, die energetische Verluste für die Erzeugung, Verteilung und Speicherung enthalten. Für die weiteren Berechnungen werden aus den Endenergiekennwerten spezifische Heizenergiekennwerte (Nutzenergie) abgeleitet. Hierzu werden Nutzungsgrade der Wärmeerzeuger bzw. Wärmeübergabestationen (bei Fern-/Nahwärme) mit den Endenergiekennwerten verknüpft. Hierdurch können die Aufwendungen der einzelnen Energiesysteme herausgerechnet werden. Aufgrund fehlender amtlicher Daten zu Nutzungsgraden im Gebäudebestand wurden wissenschaftliche Studien sowie Verordnungen zu Nutzungsgraden ausgewertet (Tab. 14).

Tab. 14: Jahresnutzungsgrade von Heizungsanlagen

Energieträger	Bandbreite aus Studien	Eigene Annahmen für 2011	Quellen
Erdgas	80-98	88	Jagnow, K. & Wolff, D. (2007), Blesl, M. <i>et al.</i> (2008), Seefeldt, F. <i>et al.</i> (2012), Techem GmbH (2016), Kemmler, A. <i>et al.</i> (2017), Techem GmbH (2017)
Heizöl	76-93	84	Jagnow, K. & Wolff, D. (2007), Blesl, M. <i>et al.</i> (2008), Seefeldt, F. <i>et al.</i> (2012), Techem GmbH (2016), Kemmler, A. <i>et al.</i> (2017), Techem GmbH (2017)
Fern-/ Nahwärme	90-100	95	Blesl, M. <i>et al.</i> (2008), Seefeldt, F. <i>et al.</i> (2012), Techem GmbH (2016), Kemmler, A. <i>et al.</i> (2017), Techem GmbH (2017)

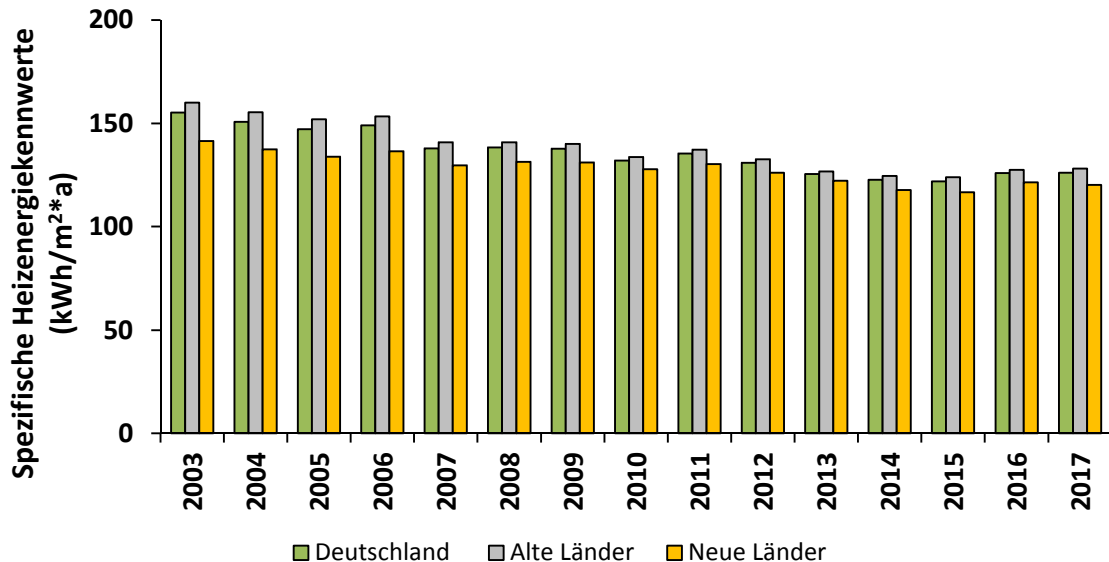
Weiterhin werden Informationen zur Verteilung der Heizungssysteme im betrachteten Wohngebäudebestand zur Gewichtung der spezifischen Nutzungsgrade der Heizungssysteme benötigt. Für die nationale oder die Landesebene können Informationen zur Ausstattung mit Heizungssystemen den amtlichen Statistiken (Mikrozensus) entnommen werden. Da die Daten nur in Abständen von vier Jahren erhoben werden, sind für die fehlenden Jahre die Anteile zu extrapolieren.

Analysen unterhalb der Landesebene unterliegen hingegen der Problematik, dass Daten zur Verteilung der Heizungssysteme nur unzureichend verfügbar sind. Hier müssen z. B.

Annahmen auf Basis nationaler bzw. landesbezogener Informationen und spezifischer Studien getroffen werden. Für Deutschland beispielsweise liegt der Anteil von Sammelheizungsanlagen für Gas bei rund 53 %, für Heizöl bei 19 % und für Fern-/Nahwärme bei 25 % (DESTATIS 2016).

Energiekennwerte

Um von den zuvor dargelegten Betrachtungen zu konkreten Energiekennwerten zu schließen wird auf Analysen des DIW (Michelsen, C. & Müller-Michelsen, S. 2010, Michelsen, C. *et al.* 2014, Michelsen, C. 2015, 2016, Michelsen, C. & Ritter, N. 2017, Stede, J. *et al.* 2018) zurückgegriffen. Die darin dargelegten spezifischen Heizenergiekennwerte beruhen auf Analysen der Energieabrechnungen des Messdienstleisters Ista durch das DIW. Die Messdaten stammen von Wohngebäuden mit zwei und mehr Wohneinheiten und verteilen sich über das gesamte Bundesgebiet. Die Heizenergiekennwerte sind witterungsbereinigt und werden durch das DIW für mehrere Raumabgrenzungen dargelegt. So liegen Heizenergiekennwerte für Deutschland, für die alten und neuen Bundesländer, für die 16 Bundesländer und Stadtstaaten sowie für die 96 Raumordnungsregionen Deutschlands vor. Die Heizenergiekennwerte reichen vom Jahr 2003 bis zum Jahr 2017 (Abb. 21).



Grafik: Norbert Krauß

Quelle: Michelsen & Müller-Michelsen 2010, Michelsen *et al.* 2014, Michelsen 2015, 2016, Stede *et al.* 2018

Abb. 21: Spezifische Heizenergiekennwerte von Mehrfamilienhäusern in Deutschland, den alten und neuen Ländern

Da es sich bei den spezifischen Heizenergiekennwerten um jährliche Verbrauchsmessungen handelt, enthalten diese auch Sanierungsmaßnahmen im Bestand, was sich durch die abfallenden Heizenergiekennwerte in Abb. 21 schlussfolgern lässt. Infolgedes-

sen müssen bei den Berechnungen keine Abschätzungen zum Sanierungsstand der Gebäude getroffen werden. Ebenfalls in den Heizenergiekennwerten enthalten ist das Nutzer/innenverhalten, welches erheblichen Einfluss auf den Verbrauch besitzt (Stockinger, V. 2015, Sonnberger, M. & Zwick, M. M. 2016). Der Vorteil der vorliegenden Heizkennwerte ist, dass die Heizkennwerte für die Jahre 2003 bis 2017 verfügbar sind und die Systematik der Erhebung und deren Auswertung einer einheitlichen Methodik folgt.

4.1.3 Modelle zur Modellierung von Heizlastprofilen

Für die Modellierung von Heizwärmelastgängen kommen z. B. dynamische Gebäudesimulationsprogramme zum Einsatz, die das thermische Verhalten von Gebäuden simulieren und hierdurch u. a. auch Heizlastgänge modellieren können. Hierzu gehören z. B. Simulationstools wie EnergyPlus⁹ oder TRANSYS¹⁰. Für die Simulation werden jedoch fundiertes Wissen zu den physikalischen Vorgängen und eine erhebliche Menge an Daten benötigt. Aufgrund der Komplexität und der benötigten Datenmenge werden in dynamischen Gebäudesimulationsprogrammen i. d. R. einzelne Gebäude betrachtet.

Verfahren, wie das Referenzlastprofilverfahren (VDI 4655 2008) oder das Standardlastprofilverfahren verzichten auf eine detaillierte Simulation des physischen Gebäudeverhaltens und greifen auf gemessene Heizlastgänge zurück. Das Referenzlastprofil-Verfahren des Vereins Deutscher Ingenieure wurde zur wirtschaftlichen Bewertung von kleinen KWK-Anlagen in Wohngebäuden mit einer Brennstoffleistung bis 70 kW erarbeitet (VDI 4655 2008). Zur wirtschaftlichen Bewertung wurden mehrere Lastgänge von Heizwärme, Strom und Warmwasser von Ein- und Mehrfamilienhäusern gemessen und ausgewertet. Aufgrund der großen Datenmenge wurden für die bessere Handhabung aus den vorliegenden Messdaten typische Lastprofile für zehn ausgewählte Typtage erarbeitet. Die Lastprofile liegen unterteilt nach Gebäudetyp (Ein- und Mehrfamilienhaus) und Anwendungsbereichen (Heizen, Strom, Warmwasser) vor.

Im Rahmen der Liberalisierung der Gasmärkte wurden zum verursachergerechten Gasbezug und zur Prognose des Gasbedarfs 2002 das Standardlastprofil-Verfahren von der TU München (Hellwig, M. 2003) erarbeitet. Ziel war es ein Verfahren zu entwickeln, welches mit möglichst geringem Aufwand (Zeit, Daten, Rechenleistung) den zukünftigen Gasbedarf unterschiedlicher Kleinkundengruppen, also Verbrauchsstellen mit einem Jahresgasbezug unter 1,5 GWh, abbilden kann. Hierzu wurden acht Profile für Haushalte und 15 Profile für Gewerbe, Handel und Dienstleistung erarbeitet. Aufgrund der Forschungsfrage wird der Gewerbebereich nicht weiter beleuchtet. Das SLP-Verfahren wurde seit der ersten Entwicklung im Rahmen mehrerer Gutachten überarbeitet (BGW 2006,

⁹ EnergyPlus; Finanziert durch das U.S. Department of Energy's (DOE) Building Technologies Office (BTO); Verwaltet wird es durch das National Renewable Energy Laboratory (NREL). URL: <https://energyplus.net>; Letzter Zugriff: 20.06.2020.

¹⁰ TRNSYS - Transient System Simulation Tool; URL: <http://www.trnsys.com>; Letzter Zugriff: 20.06.2020.

Roon, S. v. *et al.* 2014, BDEW *et al.* 2015), um die Anwendung zu vereinfachen (Reduzierung der Profile), weitere Einflussfaktoren bei der Berechnung zu berücksichtigen (Einfluss von Wind) und die Qualität der Prognosen zu verbessern.

4.1.4 Berechnung des Heizwärmebedarfs und Modellierung der Wärmelast im Modell

Für die Berechnung des Heizwärmebedarfs im Modell werden aufbauend auf den Ausführungen in Kapitel 4.1.2 spezifische Heizenergiekennwerte für die in Abschnitt 3.2 beschriebenen Gebäudevertreter abgeleitet. In Verbindung mit dem Siedlungsmodell und den darin generierten Strukturtypen kann der Heizwärmebedarf für das Fallbeispiel bestimmt werden. Im Anschluss wird auf die Modellierung des zeitlichen Heizwärmebedarfsverhaltens im Modell eingegangen. Hierzu wird auf das Standardlastprofil-Verfahren zurückgegriffen. Zunächst wird kurz auf das SLP-Verfahren eingegangen und die Berechnungsschritte dargelegt. Im Anschluss daran erfolgt die Adaption des SLP-Verfahrens für das Modell.

Spezifische Heizenergiekennwerte im Modell

Ausgangsbasis für die spezifischen Heizkennwerte im Modell bilden Daten aus den Veröffentlichungen des Messdienstleisters Techem (Techem GmbH 2010, 2016, 2017) und aus Untersuchungen des DIW (Michelsen, C. *et al.* 2014, Michelsen, C. 2015, 2016, Michelsen, C. & Ritter, N. 2017, Stede, J. *et al.* 2018).

Aus den Untersuchungen von Michelsen, C. *et al.* (2014), Michelsen, C. (2015, 2016), Michelsen, C. & Ritter, N. (2017), Stede, J. *et al.* (2018) wird zunächst, aus den verfügbaren Regionen, der Heizenergiekennwert (HEK) für die passende Region und das betrachtete Jahr ausgewählt. Dieser Heizenergiekennwert spiegelt den spezifischen Verbrauch des Mehrfamilienhausbestands in der ausgewählten Region und Jahr wider. Um den Heizenergiekennwert für die einzelnen Gebäudegrößen zu bestimmen, wird dieser durch den $[f_{nWE}]$ angepasst. Der Faktor $[f_{nWE}]$ kann hierbei die Werte aus Tab. 12 annehmen. Hierzu wird der Heizenergiekennwert mit folgender Formel berechnet.

$$HEK_{Reg} = HEK * \left(\frac{f_{Wfl}}{f_{\emptyset Wfl}} \right) \quad [-] \quad \text{Formel [16]}$$

Der Faktor $[f_{\emptyset WE}]$ steht hierbei für den größenabhängigen Faktor $[f_{nWE}]$, dessen Gebäudegröße am nächsten dem regionalen Durchschnitt des Mehrfamilienhausbestands entspricht (durchschnittliche Wohnfläche je Mehrfamilienhaus). Dies wird angewendet, da die Ausgangsdaten des DIW ausschließlich den Bestand der Mehrfamilienhäuser adressieren. Am folgenden Beispiel soll dies verdeutlicht werden.

Für Deutschland beträgt die durchschnittliche Wohnfläche des Mehrfamilienhausbestands im Jahr 2011 etwa 460 m² Wohnfläche. Eingesetzt in die Formel [17] ergibt sich der Wert 0,82. Dieser Wert ist weiterhin in Verhältnis zum Kennwert [f_{nWE}] des durchschnittlichen Einfamilienhauses (0,96) in der Region zu setzen, da dieses als Referenz angesetzt wird. Daraus ergibt sich für [$f_{\emptyset WE}$] der Wert 0,85.

$$HEK_{Reg} = 1,7497 * Wfl_{MFH,Bsp}^{-0,123} \quad [-] \quad \text{Formel [17]}$$

$$HEK_{Reg} = 1,7497 * Wfl_{EFH,Bsp}^{-0,123} \quad [-] \quad \text{Formel [18]}$$

$$HEK_{Reg} = \frac{f_{\emptyset WE}}{f_{1WE}} \quad [-] \quad \text{Formel [19]}$$

Der ermittelte Wert für [$f_{\emptyset WE}$] ist im Anschluss in die nachfolgende Formel einzusetzen. Hieraus leitet sich der Heizenergiekennwert für das durchschnittliche Einfamilienhaus ab.

$$HEK_{EZH,Bsp} = 135 \frac{kWh}{m^2 * a} * \left(\frac{1,0}{0,85} \right) \quad \rightarrow \quad 159 \frac{kWh}{m^2 * a}$$

Anschließend wird zwischen freistehenden, Doppelhäusern und gereihten Wohngebäuden unterschieden. Dies erfolgt, da der ermittelte Minderverbrauch/-bedarf von 5-30 % von Doppelhaushälften und Reihenhäusern sich ausschließlich bei einem Vergleich mit freistehenden Einfamilienhäusern ergibt. Der zuvor ermittelte Heizenergiekennwert ist jedoch das Ergebnis des größenabhängigen Effekts. Daher ist anzunehmen, dass der ermittelte HEK das gewichtete Mittel aus freistehenden Einfamilienhäusern, Doppelhaushälften und Reihenhäusern wiedergibt. Setzt man nun für Doppelhaushälften und Reihenhäuser eine Heizenergieeinsparung von 5 % und für Reihemittelhäuser von 20 % an, dann ergibt sich für Deutschland ein Einspareffekt von rund 10 % gegenüber freistehenden Einfamilienhäusern. Bei einer Aufteilung des Gebäudebestands der Ein- und Zweifamilienhäuser in rund 65 % freistehende und 35 % gereihter Gebäude und Doppelhaushälften (Landesamt für Statistik Niedersachsen 2015), ergibt sich ein Heizenergiekennwert von -4 % für gereimte Gebäude und Doppelhaushälften und +6 % für freistehende Wohngebäude gegenüber dem durchschnittlichen HEK_{EZH} . Das gleiche Verfahren wird auch auf den Bestand der Mehrfamilienhäuser angewendet. Aufgrund eines höheren Anteils an gereihten Gebäuden fallen Aufschlag und Minderung anders aus als beim Bestand der Ein- und Zweifamilienhäuser. Für freistehende Mehrfamilienhäuser be-

trägt der Aufschlag rund 5 % und für gereichte Mehrfamilienhäuser liegt der Abschlag bei ebenfalls rund 5 %.

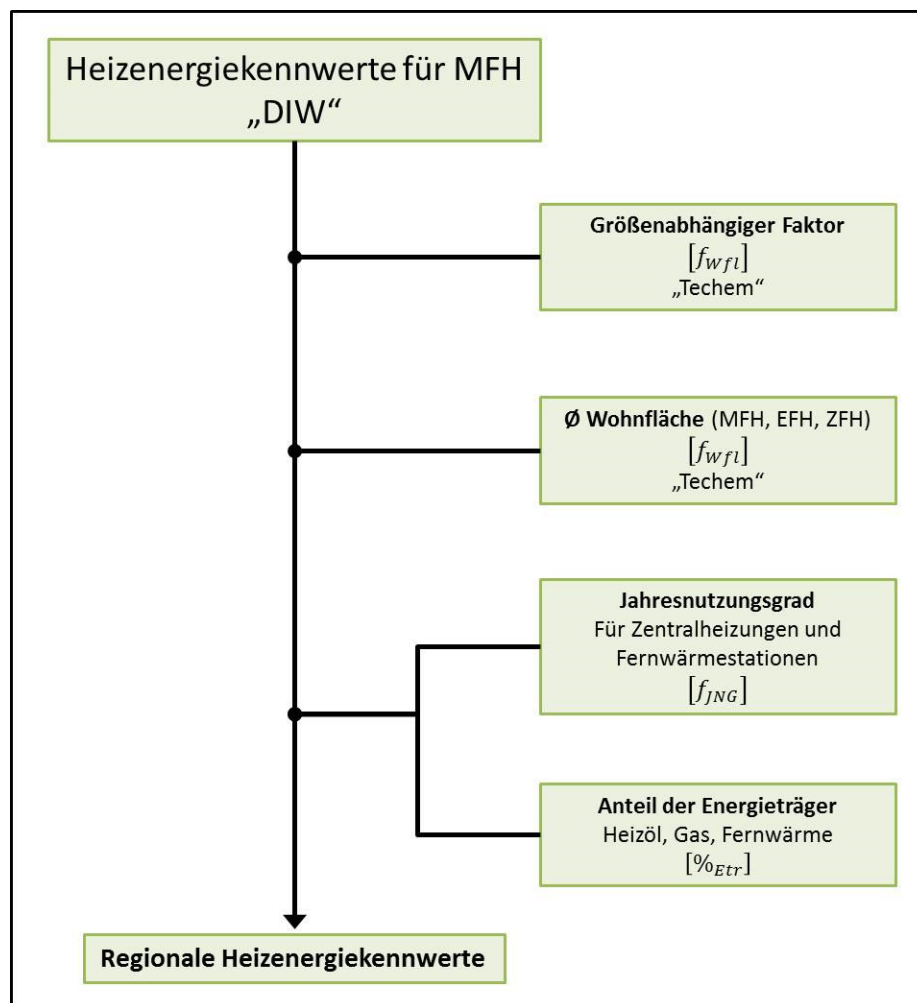
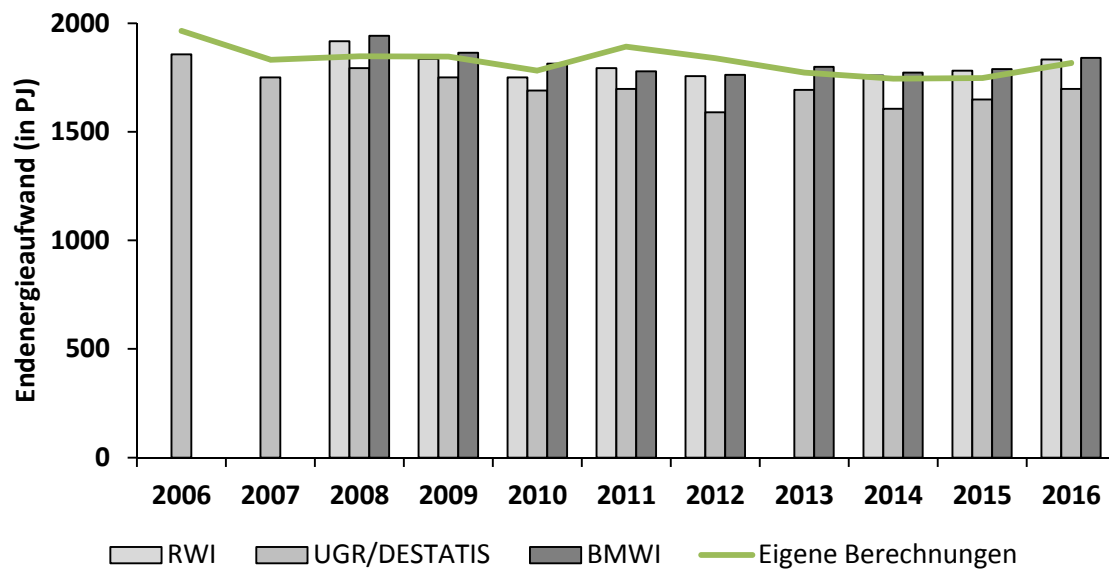


Abb. 22: Schemata zur Berechnung der regionalen Heizenergiekennwerte (Eigene Darstellung)

Eine Gegenüberstellung mit Energiebilanzen des Rheinisch-Westfälischen Instituts für Wirtschaftsforschung (RWI 2011b, a, 2012, 2013), des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie (BMWi 2017) sowie mit Berechnungen der umweltökonomischen Gesamtrechnung (UGR) des Statistischen Bundesamtes (DESTATIS 2018) zeigt die Abweichungen bzw. die Übereinstimmungen zwischen den eigenen Berechnungen und den bestehenden Bilanzen. Wie aus der Abb. 23 hervorgeht, liegt für mehrere Jahre eine gute Übereinstimmung mit den Bilanzen des RWI und des BMWi vor. Die Abweichungen zwischen den eigenen Berechnungen und den Bilanzen des RWI und des BMWi liegen zwischen -5 % und +5 %. Etwas höher fallen die Unterschiede zwischen den eigenen Berechnungen und der UGR (DESTATIS) aus. Diese betragen zwischen +3 % und +16 %. Insbesondere die Jahre 2011 und 2012 fallen hierbei auf. Die Hintergründe hierfür konnten jedoch nicht geklärt werden.



Grafik: Norbert Krauß

Daten: BMWi (2018); RWI (2011, 2012, 2013, 2017); DESTATIS (2018)

Abb. 23: Gegenüberstellung des berechneten Heizenergieverbrauchs für Deutschland mit Bilanzen von DESTATIS (UGR), RWI und BMWi

Heizwärmelast im Modell

Zur Modellierung des zeitlichen Heizwärmebedarfsverhaltens im Modell wird das Standardlastprofil-Verfahren angewendet. Hierzu werden der Kundenwert $[KW]$, der temperaturabhängige Lastprofilfunktionswert $[h(\vartheta)]$, die gewichtete Tagesmitteltemperatur des zu berechnenden Tages $[T_{Allokation}]$ und der Heizwärmebedarf $[Q_N]$ für den betrachteten Zeitraum $[N]$ benötigt. Zunächst werden hierzu die Lastprofilfunktionswerte $[h(\vartheta)]$, wie in Formel [20] dargestellt, ermittelt. Die Variablen (A, B, C und D) sind in Abhängigkeit des Gebäudetyps und der Baualterskategorie auszuwählen.

$$h(\vartheta) = \left(\frac{A}{1 + \left(\frac{B}{\vartheta_{geo} - \vartheta_0} \right)^C} + D \right) + \left[\max \left\{ \begin{array}{l} m_H * \vartheta_{geo} + b_H \\ m_W * \vartheta_{geo} + b_W \end{array} \right\} \right] \quad \text{in } [-] \quad \text{Formel [20]}$$

Durch die Variablen A, B und C kann die Steigung der Sigmoidal-Kurve angepasst werden. D hingegen stellt einen temperaturunabhängigen Minimal-Verbrauch dar. Hierbei handelt es sich um den Verbrauch von Gas zur Bereitstellung von Warmwasser. $[\vartheta]$ ist die gewichtete Tagesmitteltemperatur (geometrische Reihe) und für $[\vartheta_0]$ wird 40°C angesetzt. Der gewichtete Tagesmittelwert wird mittels der Formel [21] berechnet. Hierzu werden die Tagesmittelwerte $(T_{D-1}, T_{D-2}, T_{D-3})$ der letzten drei Tage und des betrachteten Tages (T_D) eingesetzt.

$$\vartheta_{geo} = \frac{T_D + 0,5 * T_{D-1} + 0,25 * T_{D-2} + 0,125 * T_{D-3}}{1 + 0,5 + 0,25 + 0,125} \quad \text{in } [^{\circ}\text{C}] \quad \text{Formel [21]}$$

Liegen die Lastprofilfunktionswerte $[h(\vartheta)]$ für den zu betrachtenden Zeitraum vor, wird der Kundenwert gemäß der Formel [22] berechnet:

$$KW = \frac{Q_N}{\sum_i^N h(\vartheta_{Di})} \quad \text{in } [kWh] \quad \text{Formel [22]}$$

Liegen der Kundenwert und die Lastprofilfunktionswerte vor, kann zur Berechnung stündlicher Heizwärmebedarfe auf die hinterlegten temperaturabhängigen Stundenfaktoren zurückgegriffen werden. Die temperaturabhängigen Stundenfaktoren liegen differenziert für die beiden Gebäudekategorien Einfamilien- und Mehrfamilienhäuser vor. Sie sind jeweils spezifischen Temperaturspannen und Stunden zugeordnet. Durch die Multiplikation des Kundenwertes mit dem Lastprofilfunktionswert für den Tag D erhält man den Heizwärmebedarf am Tag D $[Q_D]$.

$$Q_D = KW * h(\vartheta_D) \quad \text{in } [kWh] \quad \text{Formel [23]}$$

$$Q_N = Q_D * N \quad \text{in } [kWh] \quad \text{Formel [24]}$$

Die in Hellwig, M. (2003) zugrunde gelegten Stundenfaktoren differenzieren zwischen Gebäudekategorie, Baualterskategorie und Anwendungsbereich (Raumwärme und Warmwasser; Raumwärme). Zur einfacheren Anwendung wurden in den nachfolgenden Gutachten die Stundenfaktoren teilweise zusammengefasst, so dass eine Unterscheidung nach Baualterskategorie und Anwendungsbereich nur noch indirekt, durch eine Gewichtung berücksichtigt wird. Hinzugekommen ist hingegen die Differenzierung nach windreichen und windärmeren Standorten.

Für die Berechnungen im Modell müssen einzelne Aspekte im SLP-Verfahren angepasst werden. Hierzu gehört der Energieaufwand für den Warmwasserverbrauch, der im SLP-Verfahren i. d. R. enthalten ist, im vorliegenden Modell jedoch über ein separates Verfahren ermittelt wird. Eine ausschließliche Modellierung der Heizwärmelast ist aufgrund der hinterlegten Berechnungsformeln ohne weiteres möglich. So wird der Warmwasserverbrauch in der Formel [20] als Konstante D erfasst. Setzt man die Konstante $D = 0$, dann entfällt der konstante Verbrauch des Warmwassers (vgl. Hellwig, M. 2003, S. 49-51, BGW 2006). Weiterhin entfällt der lineare Formelbestandteil $[m_W * \vartheta + b_W]$.

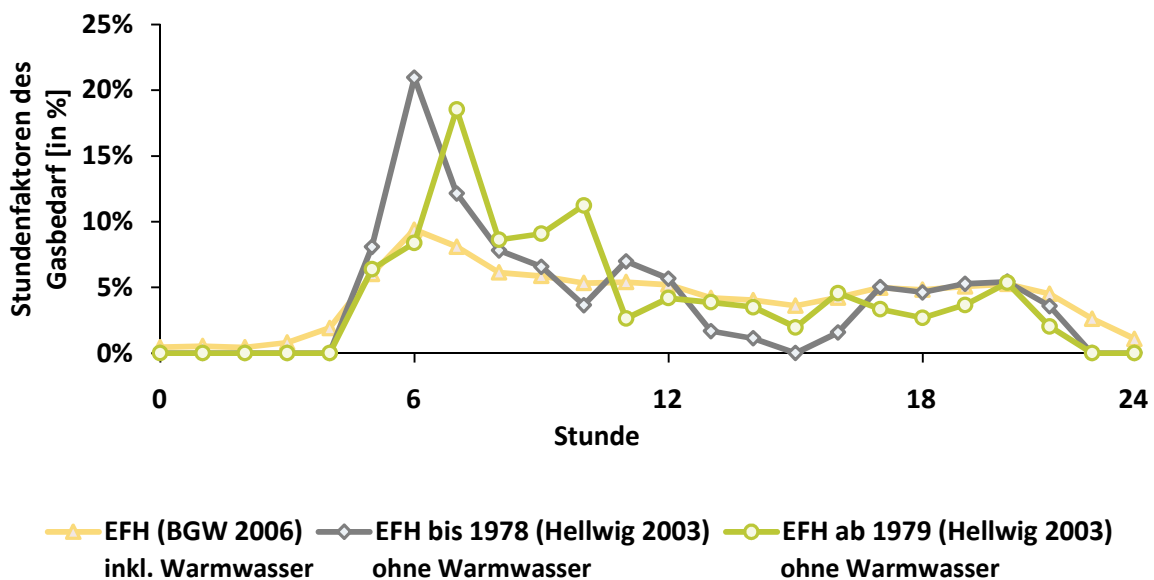
Da für die Modellierungen im vorliegenden Modell auf Klimadaten des Datensatzes der Testreferenzjahre zurückgegriffen wird, kann auf die Berechnung der Allokationstemperatur durch die geometrische Reihe verzichtet werden. Anstelle der Allokationstemperatur

$[\vartheta_{geo}]$ wird der arithmetische Mittelwert der stündlichen Lufttemperatur eines Tages der Testreferenzjahre $[\vartheta_{TRY}]$ verwendet. Im Ergebnis ergibt sich die Formel [25]:

$$h(\vartheta) = \left(\frac{A}{1 + \left(\frac{B}{\vartheta_{TRY} - \vartheta_0} \right)^C} \right) + [m_H * \vartheta_{TRY} + b_H] \quad \text{in } [-] \quad \text{Formel [25]}$$

Die Berechnung des Kundenwertes $[KW]$ erfolgt weiterhin gemäß der Formel [22]. Für den Heizwärmeverbrauch $[Q_N]$ wird auf die in Kapitel 4.1 dargelegten Berechnungen zum Heizwärmebedarf zurückgegriffen. Wie im SLP-Verfahren angeführt, werden die beiden Gebäudegruppen Ein- und Mehrfamilienhausbebauung jeweils separat betrachtet. Der Heizwärmebedarf kann weiterhin für ein beliebig großes Gebiet berechnet werden. Es ist jedoch zu berücksichtigen, dass der Einsatz von SLPs für die Abrechnung einer größeren Anzahl von Verbrauchsstellen (Kollektiv) erarbeitet wurde und daher auch im Modell für mehrere Abrechnungseinheiten (Gebäude) oder mehrere Baublöcke angewendet werden sollte.

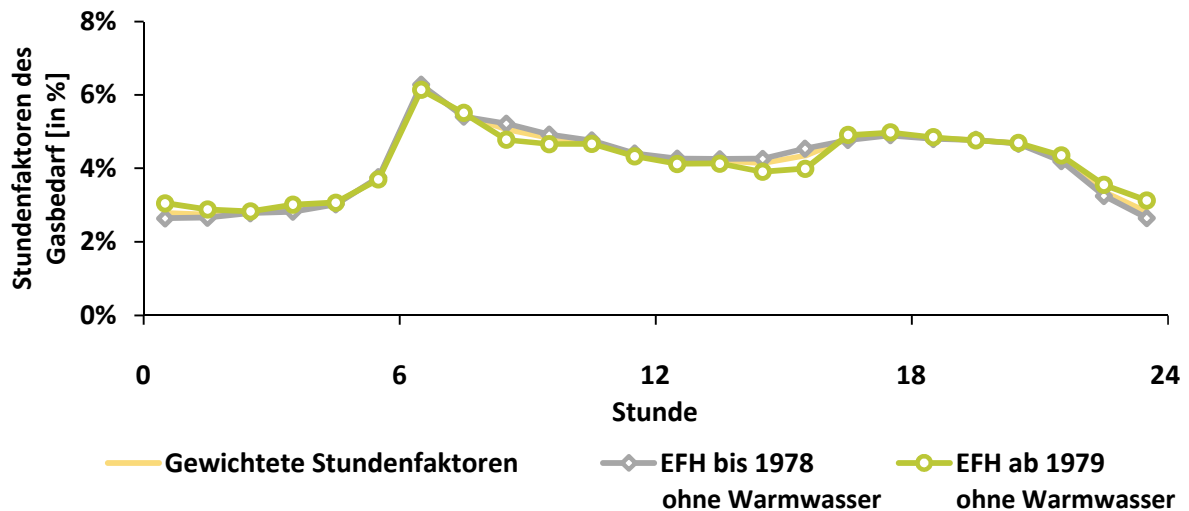
Für die stündliche Modellierung des Heizwärmebedarfs wird auf die Stundenfaktoren in Hellwig, M. (2003) zurückgegriffen. Diese liegen im Gegensatz zu den Stundenfaktoren in BGW (2006) differenziert nach Heizwärmelast mit und ohne Warmwasser vor. Hierdurch kommt es zu unterschiedlichen Ausprägungen im Tagesverlauf, insbesondere in den wärmeren Temperaturbereichen.



Grafik: Norbert Krauß
Daten: BGW (2006), Hellwig (2003)

Abb. 24: Gegenüberstellung von Stundenfaktoren am Beispiel des Temperaturbereichs 20°C bis 25°C für Einfamilienhäuser

Aufgrund der Unterteilung in die beiden Baualterskategorien „bis 1978“ und „ab 1979“ müssen die Stundenfaktoren gemäß den im Untersuchungsgebiet vorhandenen Aufteilung gewichtet werden.



Grafik: Norbert Krauß
Daten: Hellwig (2003)

Abb. 25: Einfluss der Gewichtung der Stundenfaktoren, am Beispiel der Stundenfaktoren für EFH für den Temperaturbereich -5°C bis -10°C .

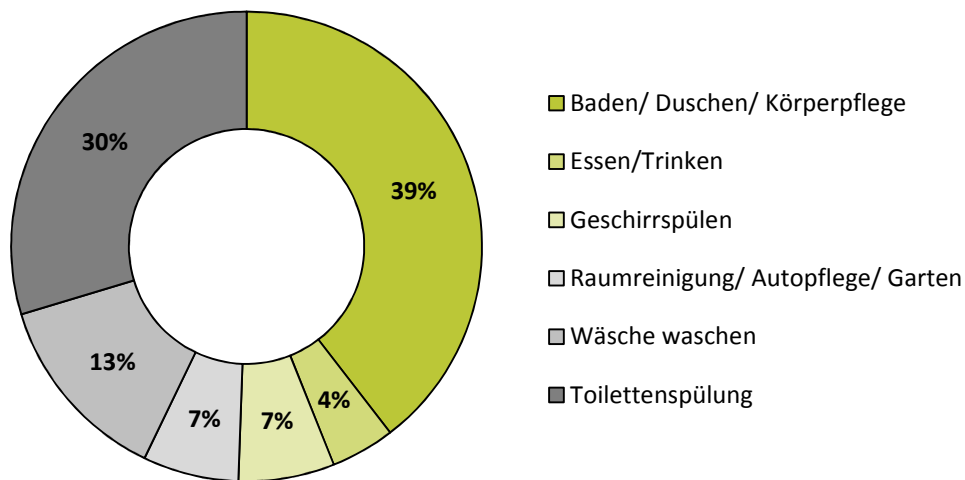
Gemäß den Ausführungen in Roon, S. v. *et al.* (2014) und BDEW *et al.* (2015) kann, je nach Standort für die Modellierung zwischen den SLP-Ausprägungen H EF/MF 33 und H EF/MF 34 gewählt werden. Hierbei steht H EF/MF 33 für windärmere Standorte mit einem mittleren Heizwärmeverbrauch und H EF/MF 34 steht für windreiche Standorte mit erhöhtem Heizwärmeverbrauch. Den windärmeren Standorten können die Bundesländer Hessen, Rheinland-Pfalz, Saarland, Sachsen, Sachsen-Anhalt, Thüringen, Baden-Württemberg und Bayern zugeordnet werden und den windreichen Standorten können die Bundesländer Schleswig-Holstein, Mecklenburg-Vorpommern, Brandenburg, Niedersachsen, Teile von Nordrhein-Westfalen, Bremen und Berlin zugeordnet. Die für die Modellierung benötigten Parameter (A, B, C, m_H und b_H) können der Tab. 15 entnommen werden.

Tab. 15: Parameter der SigLine-Berechnung im Standardlastprofilverfahren

Gebäude-kategorie	Berechnungsfaktoren							
	A	B	C	D	m_H	b_H	m_W	b_W
EFH	1,381966	-37,412416	6,172318	0,039628	-0,067216	1,116714	-0,001998	0,135507
MFH	1,044354	-35,033375	6,224063	0,050292	-0,053583	0,999590	-0,002176	0,163330

4.2 Energieaufwand für die Bereitstellung von Warmwasser in privaten Haushalten

Jährlich werden in den privaten Haushalten pro Kopf rund 1.300 kWh Energie (Endenergie) für die Bereitstellung von Warmwasser aufgewendet. Dies entspricht rund 16 % des Energieverbrauchs privater Haushalte im häuslichen Bereich (BMWI 2017). Der Einsatz von Warmwasser ist i. d. R. mit der Körperpflege, Waschen, Kochen und der Reinigung der Wohnung verbunden (BDEW 2017). Diese sind Ausdruck der persönlichen Bedürfnisse und Lebensstile der Haushaltsmitglieder (Abb. 26). Bedürfnisse und Lebensstile werden wiederum durch gesellschaftskulturelle (z. B. Wertevorstellungen), soziodemographische (z. B. Alter, Haushaltsgröße) und ökonomische Aspekte (z. B. Einkommen und Ausstattung) geprägt (Lutz, J. D. *et al.* 1996, Kähler, A. & Klein, J. 2014, Ahmed, K. *et al.* 2015, Parker, D. S. *et al.* 2015, Kleinhüchelkotten, S. *et al.* 2016, Sonnberger, M. & Zwick, M. M. 2016). Zusammen mit technischen Aspekten (Art der Bereitstellung, technische Qualität von Weißer Ware¹¹) beeinflussen diese in unterschiedlichem Maß den Konsum von Warmwasser und den damit verbundenen Energieaufwand.



Grafik: Norbert Krauß
Daten: BDEW 2017

Abb. 26: Aufteilung des Trinkwasserverbrauchs nach Verwendungszweck in privaten Haushalten

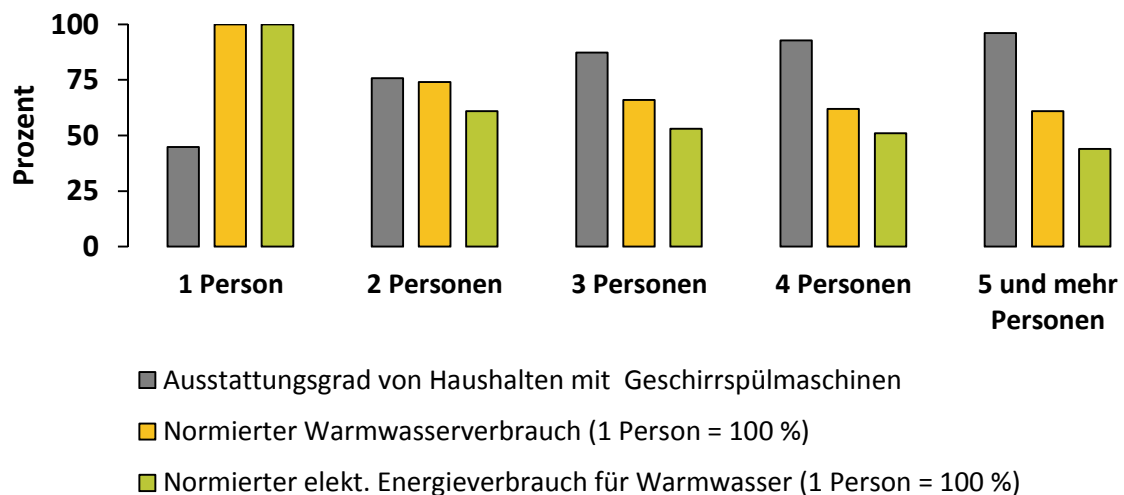
4.2.1 Einflussfaktoren des häuslichen Warmwasserkonsums und dem damit verbundenen Energieverbrauch

Untersuchungen in Europa und Nordamerika heben neben technischen Faktoren (Wirkungsgrad der Bereitstellung) insbesondere sozioökonomische Faktoren (z. B. Alter, Haushaltsgröße, Einkommen, Lebensstil) als zentrale Einflussgrößen des Energiever-

¹¹ Unter dem Begriff „Weiße Ware“ werden Haushalts(groß)geräte wie Kühl- und Gefrierschränke, Waschmaschinen und Wäschetrockner zusammengefasst.

brauchs für Warmwasser hervor (Aguilar, C. *et al.* 2005, Knüsel, P. & Gallati, M. 2011). Dabei kommt den einzelnen sozioökonomischen Faktoren eine unterschiedlich hohe Bedeutung zu.

Als zentrale Einflussgröße für den Warmwasserverbrauch wird in Untersuchungen durchweg die Anzahl der Haushaltsmitglieder angeführt. In den Untersuchungen zeigt sich, dass die konsumierte Menge an Warmwasser bzw. der damit verbundene Energieverbrauch mit der Haushaltsgröße steigt (Defra 2008, EnergieAgentur.NRW 2011, BDEW 2013, Evarts, J. C. & Swan, L. G. 2013, EnergieAgentur.NRW 2015, Parker, D. S. *et al.* 2015, Fischer, D. *et al.* 2016, co2online 2017). Dies ist nachvollziehbar, da mit jeder weiteren Person im Haushalt zusätzlich Warmwasser, z. B. für die Körperpflege verbraucht wird. Dem entgegengesetzt, sinkt jedoch die konsumierte Menge an Warmwasser bzw. der Energieverbrauch je Haushaltsmitglied (Abb. 27).



Grafik: Norbert Krauß

Abb. 27: Ausstattungsgrad mit Geschirrspülmaschinen, normierter elektr. Energieverbrauch und Warmwasserverbrauch je Person nach Haushaltsgröße

Untersuchungen von Parker, D. S. *et al.* (2015) zeigen z. B., welchen Einfluss die Anwesenheit von Kindern und/oder Jugendlichen auf den Verbrauch von Warmwasser und den damit verbundenen Energieaufwand hat. So verbrauchen Kinder (bis 12 Jahre) weniger und Jugendliche (zwischen 13 und 23 Jahre) mehr Warmwasser pro Tag als Erwachsene (ab 24 Jahre) in den untersuchten Haushalten. Nicht eindeutig sind hingegen Untersuchungen zum Energie- bzw. Warmwasserverbrauch älterer Personengruppen (Senioren, Pensionäre). So verbrauchen laut Lutz, J. D. *et al.* (1996) Senioren-Haushalte weniger Warmwasser als der durchschnittliche Haushalt. Fischer, D. *et al.* (2016) weisen hingegen für Personen im Ruhestand¹² den höchsten Energieverbrauch für Warmwasser aus.

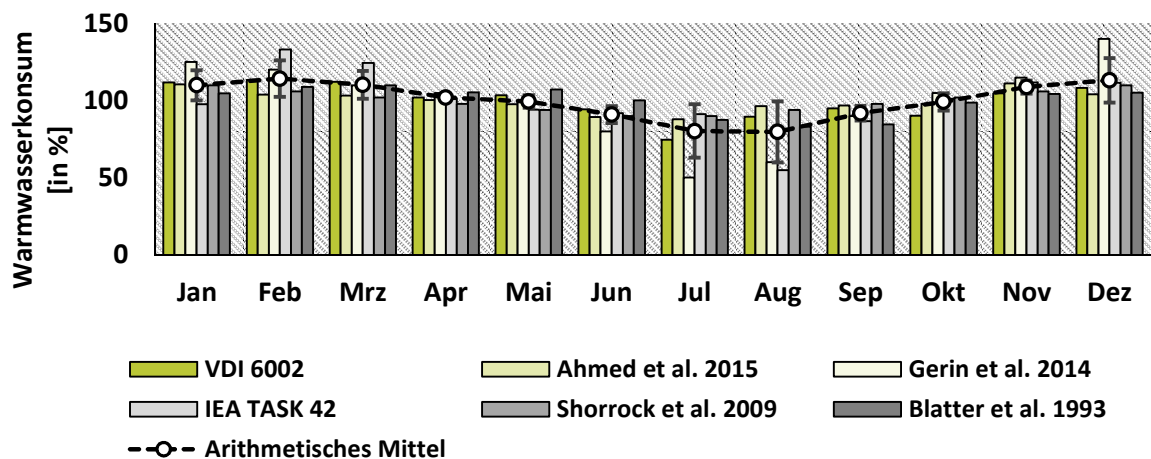
¹² Die Mehrheit der Personen im Ruhestand entspricht der üblichen Definition von Senioren (über 65 Jahre).

Faberi, S. *et al.* (2007) wiederum zeigte den Einfluss von Geschirrspülern auf den Warmwasserkonsum. So besitzen Haushalte, die ihr Geschirr per Hand spülen, einen teils erheblich höheren Warmwasserverbrauch als Haushalte mit einer Geschirrspülmaschine. Entscheidend ist hierbei jedoch auch das Spülverhalten der Haushalte (fließendes Wasser, Wassertemperatur, usw.) und die technische Qualität der Spülmaschine. In diesem Zusammenhang kommt auch der Ausstattung der Haushalte mit ausgewählten Haushaltsgeräten eine Bedeutung beim Konsum von Warmwasser und dem damit verbundenen Energieverbrauch zu. Betrachtet man z. B. die Ausstattung der privaten Haushalte mit der zuvor angeführten Geschirrspülmaschine, dann zeigt sich, dass nur etwa die Hälfte der 1-Personen-Haushalte eine Geschirrspülmaschine besitzt (DESTATIS 2015). Mit steigender Haushaltsgröße steigt auch der Anteil der Haushalte mit einer Geschirrspülmaschine (Abb. 27). Die verringerte Ausstattung der Single-Haushalte mit Geschirrspülmaschinen könnte, in Anlehnung an Faberi, S. *et al.* (2007), zu einem erhöhten Einsatz von Warmwasser schließen lassen.

Insgesamt zeigt sich in den Untersuchungen, dass der Haushaltsgröße eine zentrale Bedeutung beim Warmwasserverbrauch und dem damit verbundenen Energieverbrauch zukommt (Knüsel, P. & Gallati, M. 2011). So bestehen zwischen der Haushaltsgröße und anderen sozioökonomischen Merkmalen (z. B. Lebensstil, Anwesenheit von Kindern, Alter, Ausstattung, usw.) Wechselwirkungen, die Einfluss auf den Warmwasserkonsum und den Energieverbrauch haben (Aguilar, C. *et al.* 2005). Während der Konsum von Warmwasser durch die Bedürfnisse und den Lebensstil der Haushalte beeinflusst werden, ist der damit verbundene Energieaufwand das Resultat der konsumierten Menge und des Wirkungsgrads der technischen Bereitstellung (Wärmeerzeuger, Verteilung).

Einfluss klimatischer Bedingungen und Witterung

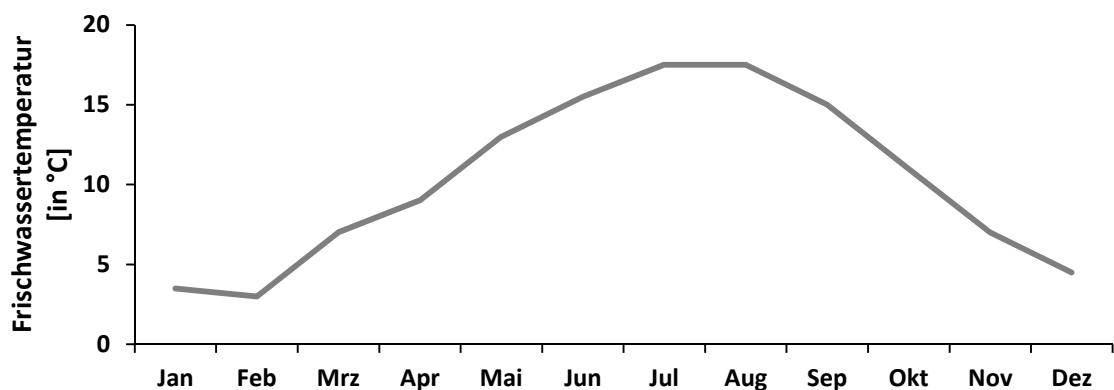
Untersuchungen von (Blatter, M. *et al.* 1993) zum Warmwasserverbrauch und dessen Charakteristiken führen klimatische Bedingungen als einen zu berücksichtigenden Einflussfaktor des Wasserverbrauchs an. So beeinflusst die Lufttemperatur das Verhalten bzw. das Bedürfnis nach warmem Wasser. Höhere Lufttemperaturen führen demzufolge zu einem verringerten Warmwasser- und Energieverbrauch. Wie in Abb. 28 gezeigt wird, liegt der Warmwasserverbrauch in den Sommermonaten unter dem Warmwasserverbrauch in den Wintermonaten (Blatter, M. *et al.* 1993, Defra 2008, Gerin, O. *et al.* 2014, VDI 6002 2014, Ahmed, K. *et al.* 2015, George, D. *et al.* 2015).



Grafik: Norbert Krauß

Abb. 28: Konsum von Warmwasser im Jahresverlauf

Der Energieverbrauch für die Bereitstellung von Warmwasser wird zusätzlich zur konsumierten Menge an Warmwasser durch die Zapftemperatur und die Temperatur des Frischwassers beeinflusst. So zeigen Untersuchungen von Gassel, A. (1997), Defra (2008) und Gerin, O. *et al.* (2014), dass die Temperatur des Frischwassers (Kaltwasser) in den Sommermonaten steigt (Abb. 29). Zusätzlich sinkt die durchschnittliche Zapftemperatur in den Sommermonaten, was dazu führt, dass die Temperaturdifferenz sinkt, was wiederum einen verringerten Energieverbrauch zur Folge hat.

Grafik: Norbert Krauß
Daten: Gerin et al. (2014)Abb. 29: Variation der Temperatur von Frischwasser innerhalb eines Jahres für Brüssel nach Gerin, O. *et al.* (2014)

Anwesenheit

Zusätzlich zum verringerten Bedürfnis nach warmem bzw. heißem Wasser sinkt der Warmwasserkonsum in den Sommermonaten auch infolge erhöhter Abwesenheit der Bewohner/innen aufgrund der Urlaubs- und Ferienzeit. Dies geht in Form einer verringerten Belegung in die Berechnungen ein, so z. B. in Blatter, M. *et al.* (1993) und VDI 6002.

Der Einfluss von An- und Abwesenheit führt auch innerhalb einer Woche zu einem unterschiedlichen Warmwasserkonsum. So ist der Warmwasserkonsum an Werktagen geringer als an den Wochenenden. Der höchste Verbrauch entfällt dabei auf den Sonntag. Dies ist vor allem dem Umstand geschuldet, dass die Mehrheit der Bewohner/innen an Werktagen einer geregelten Tätigkeit (Ausbildung, Berufstätig) nachgeht und daher längere Zeit abwesend ist (Parker, D. S. 2003, VDI 6002 2014, George, D. *et al.* 2015). An den Wochenenden dagegen verbringen die Bewohner/innen vermehrt Zeit in der Wohnung. In George, D. *et al.* (2015) und Parker, D. S. (2003) wurde zudem festgestellt, dass der Warmwasserkonsum von Montag zu Freitag abnimmt. In der VDI 6002 wird dagegen von einem gleichbleibenden Warmwasserkonsum ausgegangen.

Lebensstil und Tagesrhythmus

Lebensstile und Tagesrhythmen privater Haushalte beeinflussen zusätzlich zur absoluten Menge an Warmwasser auch den Warmwasserkonsum im Tagesverlauf. Der Tagesrhythmus eines privaten Haushalts wird insbesondere durch Beruf, Ausbildung oder auch Berufsuntätigkeit sowie gesellschaftliche Normen geprägt. Untersuchungen weisen dahingehend innerhalb eines Tages zwei bzw. drei Verbrauchspitzen aus (Blatter, M. *et al.* 1993, Gelažanskas, L. & Gamage, K. 2015, George, D. *et al.* 2015).

4.2.2 Methode zur Berechnung des Energiebedarfs für Warmwasser

Wie aus dem vorherigen Abschnitt hervorgeht, unterliegt der Konsum von Warmwasser und der damit verbundene Energieverbrauch sozioökonomischen und technischen Parametern. Eine Berechnung des Energieverbrauchs für Warmwasser auf der Gemeindeebene, das auf einem sozioökonomischen Modell aufbaut, erscheint aufgrund der teils unzureichenden Datenlage zu sozioökonomischen Parametern nicht sinnvoll. Wie sich jedoch auch gezeigt hat, besteht zwischen der Haushaltsgröße und dem Warmwasserkonsum bzw. dem Energieverbrauch für Warmwasser ein Zusammenhang, der bis zu einem gewissen Grad weitere sozioökonomische Faktoren mit abbildet. Daten zu den Haushalten und deren Zusammensetzung liegen aus dem Zensus 2011 für die Gemeinden Deutschlands zur freien Verfügung vor. Zusammen mit dem Berechnungsansatz für die Wohnungsbelegung aus 3.2.2 kann der Energieverbrauch für Warmwasser differenziert nach Haushalt und Gebäudetyp berechnet werden. Hierzu wird auf die nachfolgende Formel der (VDI 2067) zurückgegriffen:

$$\begin{array}{l} \text{Nutzwärmebedarf} \\ \text{für Warmwasser} \end{array} = \frac{V_W * p_W * c_W * (\vartheta_W - \vartheta_0)}{1.000.000} \quad [\text{kWh}] \quad \text{Formel [26]}$$

Für die Berechnung des Nutzenergiebedarfs werden Angaben zum Konsum von Warmwasser (V_W), die spezifische Wärmekapazität (p_W) von Wasser (bei Umgebungsdruck)

und die mittlere Dichte von Wasser (c_w) sowie Angaben zur Temperatur des Warmwassers bei der Entnahme (ϑ_w) und die Temperatur des Frischwassers (ϑ_0) benötigt.

Die spezifische Wärmekapazität (p_w) von Wasser beträgt 1,163 Wh/kg*K und die mittlere Dichte (c_w) von Wasser kann mit 1000 kg/m³ angesetzt werden. Sind die Temperatur des Frischwassers und des Warmwassers nicht bekannt, so werden nach DIN 4108-6 die Eintrittstemperatur des Frischwassers mit 10°C und die Austrittstemperatur des Warmwassers mit 50°C angesetzt (DIN V 4108 2003-6, S. 12-13).

Informationen zum Warmwasserkonsum, können Richtlinien und Studien entnommen werden. Die DIN 4108 Teil 6 z. B. gibt einen jährlichen Verbrauch von 9 m³ an, was einem Bedarf von 27 Liter pro Person und Tag entspricht¹³. In der VDI Richtlinie 2067 werden unterschiedliche Lebensstile und Lebensstandards differenziert. Die VDI Richtlinie 2067 beziffert einen niedrigen Bedarf von Warmwasser auf 10 - 30 l/P*d, einen mittleren Bedarf auf 20 - 60 l/P*d und einen hohen Bedarf auf 40 - 120 l/P*d. Untersuchungen von Schüßler (Schüßler, K. 2001) führen für den Konsum von Warmwasser in Mehrfamilienhäusern Werte zwischen 23 und 30 Liter pro Person und Tag an. Analysen zentralbeheizter Mehrfamilienhäuser durch die Techem GmbH (Kähler, A. & Klein, J. 2014, Techem GmbH 2016, 2017) weisen für 2012 bis 2016 einen durchschnittlichen Warmwasserverbrauch von 31 - 32 Liter je Person und Tag aus. In Einfamilienhäusern ist der Verbrauch laut Schüßler, K. (2001) leicht höher und liegt bei 30 bis 35 Liter pro Person und Tag. Die angeführten Richtlinien und Studien weisen, mit Ausnahme der VDI 2067, eine Bandbreite des durchschnittlichen Warmwasserkonsums von 23 bis 35 Liter je Person und Tag aus. Auf Grundlage dessen kann von einem mittleren Warmwasserbedarf von 30 Liter je Person und Tag ausgegangen werden.

4.2.3 Lastprofil des Warmwasserbedarfs

Nach dem zuvor der Berechnungsansatz zur Bestimmung des Warmwasser- und Energiebedarfs dargelegt wurde, wird nachfolgend das Verfahren zur Modellierung des zeitlichen Warmwasserbedarfs beschrieben. Für die Modellierung des Warmwasser- bzw. Energieverbrauchs finden mehrere Modellierungsansätze Anwendung. Der zeitliche Verlauf des Warmwasser- bzw. Energieverbrauchs wird z. B. durch die Kombination einzelner Zapfprofile (Zeitpunkt, Dauer, Menge, Temperatur) verschiedener Anwendungen (Wäsche waschen, Hände waschen, Geschirrspülen) oder Verbrauchsverhalten, die auf Wahrscheinlichkeitsverteilungen beruhen, simuliert (Pflugradt, N. D. 2016, Pflugradt, N. & Muntwyler, U. 2017). Es handelt sich hierbei um Bottom-up-Modelle. Diese Modelle verwenden i. d. R. hohe zeitlich aufgelöste Profile, mit Intervallen von einer Minute bis zu 15 Minuten. Nachteilig ist der vergleichsweise hohe Bedarf an Daten, die im Rahmen von

¹³ Der Berechnung liegt der jährliche Konsum von 9.000 Liter Warmwasser über 345 Tage zugrunde. Für die verbleibenden 20 Tage des Jahres wird von einer Abwesenheit der Bewohner/innen aufgrund von Urlaub ausgegangen (vgl. DIN 2067 Blatt 6).

Interviews, Messungen oder Literaturrecherchen erhoben werden müssen. Ein weiterer Aspekt ist der Untersuchungsgegenstand. Diese Bottom-up-Modelle werden mehrheitlich für die Modellierung einzelner Haushalte, Gebäude oder spezifischer Versorgungssysteme eingesetzt. Die Spanne der Modelle reicht von der Simulation, Dimensionierung und Optimierung spezifischer Warmwasserversorgungs- und Speicheranlagen in Gebäuden (VDI 2067, VDI 4655 2008, George, D. *et al.* 2015) bis hin zur Untersuchung zukünftiger Veränderungen im Konsumverhalten (Widén, J. *et al.* 2009). Eine Übertragung auf größere Untersuchungsgebiete (Gebäudeblock, Stadtteil, usw.) ist zwar grundsätzlich denkbar, i. d. R. jedoch mit einem erhöhtem Aufwand (Daten, Zeit, Rechenleistung) verbunden.

Dem gegenüber kommen auch Top-down-Ansätze zur Anwendung, die den Wasserverbrauch für einen ausgewählten Zeitraum und ein spezifisches Untersuchungsgebiet, in Form eines Summenprofils abbilden. Ein solches Summenprofil umfasst eine Vielzahl an Profilen, die durch das Nutzer/innenverhalten sowie die Ausstattung aller in die Erhebung eingeflossener Haushalte geprägt sind (VDI 6002 2014). Durch zusätzliche statistische Daten, zu Ausstattung sowie sozioökonomischen Merkmalen, können Zusammenhänge identifiziert werden. Dennoch können aufgrund der geringen Detailschärfe nur bedingt Veränderungen in der Struktur und Zusammensetzung der Haushalte bzw. Wohneinheiten berücksichtigt werden, was bei größeren Unterschieden zu erheblichen Abweichungen in der Modellierung bzw. Prognose führen kann. Die Profile besitzen i. d. R. eine zeitliche Auflösung von 60 Minuten. Aufgrund der geringen Detailschärfe und der ebenfalls geringeren zeitlichen Auflösung benötigen solche Modelle nur wenige Daten. Auch der Arbeitsaufwand ist vergleichsweise gering.

Während sozioökonomische Merkmale privater Haushalte und deren Lebensstile (vgl. Kapitel 4.2.1) vorrangig die absolute Menge des Warmwasserkonsums und den damit verbundenen Energieverbrauch beeinflussen, wird die zeitliche Nachfrage durch Verhaltensmuster, An- und Abwesenheit infolge von Berufstätigkeit, Ausbildung oder Urlaub sowie durch klimatische Bedingungen beeinflusst.

4.2.4 Berechnung und Modellierung des Warmwasserbedarfs im Modell

Nachfolgend wird der im Modell verwendete Berechnungsansatz zur Berechnung des Warmwasserbedarfs und dessen zeitlicher Verlauf (Lastprofil) dargelegt. Zunächst wird auf die Berechnung des Warmwasserbedarfs und dem damit einhergehenden Energiebedarf dargelegt. Im Anschluss daran wird die Modellierung des Lastprofils beschrieben.

Warmwasser- und Energiebedarf

Zur Abschätzung des Energiebedarfs im Modell wird ein Berechnungsansatz erarbeitet, der die Haushaltsgröße als alleinigen Parameter verwendet. Dem Berechnungsansatz liegt, ausgehend von der Literaturrecherche, die Annahme zugrunde, dass der Warmwasserverbrauch in ausreichendem Maße durch die Haushaltsgröße abgebildet werden

kann. So wurde gezeigt, dass Merkmale, wie die Anwesenheit von Kindern oder der Ausstattungsgrad mit Haushaltsgeräten in engem Zusammenhang mit der Haushaltsgröße stehen und somit durch diese mit abgebildet werden.

Ausgehend von der Literaturrecherche aus Absatz 4.2.2 wird für die Berechnungen im Modell ein durchschnittlicher Warmwasserverbrauch von 30 Litern je Person und Tag veranschlagt. Wie sich aus den Untersuchungen zum elektrischen Energieverbrauch für die Bereitstellung von Warmwasser zeigt, liegt der Pro-Kopf-Energieverbrauch für Warmwasser von Singlehaushalten über und für Haushalte mit drei und mehr Haushaltsmitgliedern unter dem durchschnittlichen Verbrauch. Weiterhin kann festgehalten werden, dass der durchschnittliche Pro-Kopf-Verbrauch etwa gleichauf mit dem Pro-Kopf-Verbrauch eines 2-Personen-Haushaltes liegt. Hieraus lässt sich schlussfolgern, dass auch für den Warmwasserverbrauch ein vergleichbarer Zusammenhang vorliegt. Untersuchungen von Defra (2008), Evarts, J. C. & Swan, L. G. (2013) und Ahmed, K. *et al.* (2015) deuten dies ebenfalls an. Infolgedessen werden aus den Untersuchungen zum elektrischen Energieverbrauch für die Bereitstellung von Warmwasser Gewichtungsfaktoren abgeleitet (EnergieAgentur.NRW 2011, BDEW 2013, EnergieAgentur.NRW 2015, Fischer, D. *et al.* 2016, co2online 2017). Mittels der Gewichtungsfaktoren und dem durchschnittlichen Warmwasserbedarf können die haushaltsgrößenabhängigen Warmwasserbedarfe ermittelt werden. Diese werden anschließend in Relation zum jeweiligen Pro-Kopf-Verbrauch eines 2-Personen-Haushalts gesetzt.

Tab. 16: Warmwasserbedarf und Energiebedarf für die Bereitstellung von Warmwasser nach Haushaltsgröße

Haushaltsgröße	Bandbreite ¹ [-]	Multiplikator ² [-]	Pro Person ³ [l/Per*d]	Warmwasser ⁵ [kWh/Per*a]
1 Person	1,03 – 2,41	1,65	50	894
2 Personen	1,00	1,00	30	542
3 Personen	0,90 – 0,95	0,95	29	515
4 Personen	0,85 – 0,95	0,90	27	488
5 und mehr Personen ⁴	0,78 – 0,83	0,80	24	433

¹ Daten aus EnergieAgentur.NRW (2011), EnergieAgentur.NRW (2015), Gießhammer *et al.* (2012), BDEW (2009)

² Arithmetische Mittelwerte, abzüglich eines Bereitstellungsverlustes bei elektr. Warmwassererzeugung von 5 %

³ Werte auf volle Zehnerstellen gerundet

⁴ Mit einer durchschnittlichen Anzahl von 5,4 Personen je Haushalt

⁵ Berechnungsgrundlagen: Einwohner nach; $\vartheta_w = 55^\circ\text{C}$; $\vartheta_0 = 10^\circ\text{C}$; $p_w = 1,163 \text{ W}/^\circ\text{C}$; Tage pro Jahr = 345 (abzüglich 20 Urlaubstage)

Als Ergebnis erhält man Faktoren, die aufzeigen, wie stark sich der personenbezogene Energieverbrauch je nach Haushaltgröße von einem 2-Personenhaushalt unterscheidet (Tab. 16). Mit einer Bandbreite von 1,03-2,41 liegt bei 1-Personen-Haushalten eine starke Spreizung des Faktors vor. Demgegenüber ist die Bandbreite der Haushalte mit drei und mehr Personen vergleichsweise gering. Für die weiteren Berechnungen wurden für jede Haushaltgröße Faktoren abgeleitet und gerundet (Tab. 16). Anhand der haushaltsgrößenabhängigen Faktoren und des durchschnittlichen Warmwasserbedarfs des 2-Personen-Haushalts kann für einen Haushalt der Warmwasserbedarf $[V_{WW}]$ berechnet werden. Hierzu wird die Anzahl der Haushaltsmitglieder $[n_{HH}]$ des betrachteten Haushalts in die nachfolgende Polynomfunktion eingetragen.

$$V_{WW} = -1,65 * HH^3 + 15,53 * HH^2 - 23,08 * HH + 58,80 \quad [\text{Liter}] \quad \text{Formel [27]}$$

Abschließend wurde für die Berechnung des warmwasserbezogenen Energiebedarfs $[Q_{WW}]$ für spezifische Wohnungsbelegungen aus den ermittelten Warmwasserverbräuchen und dem spezifischen Energieaufwand zur Erhitzung eines Liters Wasser die nachfolgende Formel [28] abgeleitet:

$$Q_{WW} = -29,81 * HH^3 + 280,43 * HH^2 - 416,76 * HH + 1061,7 \quad [\text{kWh}] \quad \text{Formel [28]}$$

Lastprofil für Warmwasser

Ausgehend von der Literaturrecherche zu bestehenden Modellen bzw. Berechnungsansätzen hat sich gezeigt, dass der zeitliche Verbrauch von Warmwasser durch klimatische Verläufe und die An- bzw. Abwesenheit der Bewohner/innen beeinflusst wird. Diese sind daher zwingend in der Modellierung des Warmwasserkonsums und dem damit verbundenen Energiebedarf zu berücksichtigen. Aufgrund des Betrachtungsgegenstands in der hier vorliegenden Arbeit wird zur Modellierung des Warmwasserbedarfs auf den in der VDI 6002 hinterlegten Berechnungsansatz zurückgegriffen. Ausschlaggebend für die Wahl des Berechnungsansatzes sind die einfache Anwendung und der geringe Datenbedarf. Der damit verbundene geringere Detaillierungsgrad wird als ausreichend genau eingestuft, da alle im Modell enthaltenen Berechnungsansätze mit einem vergleichbaren Detaillierungsgrad arbeiten. Grundlage für die Modellierung des Warmwasserlastprofils ist die nachfolgende Formel:

$$WW_S = \frac{WW_{HH}}{365} * f_M * f_T * f_s \quad \text{in [Liter]} \quad \text{Formel [29]}$$

Mittels dieser Formel kann der stündliche Warmwasserbedarf für die drei Tagestypen (Werk-, Sams- und Sonntag) berechnet werden. Hierzu werden der durchschnittliche Warmwasserbedarf je Tag $[\frac{WW_{HH}}{365}]$ sowie die Monats- $[f_m]$, Tages- $[f_d]$ und Stunden-Faktoren $[f_h]$ aus der VDI 6002 benötigt. Zur Modellierung des Warmwasserbedarfs werden zunächst allen Tagen im betrachteten Zeitraum die Stundenprofile gemäß Tagestyp zugeordnet.

Im nächsten Schritt werden die Profile der Tagestypen mit den Tages-Faktoren $[f_T]$ aus Tab. 17 multipliziert und somit die tagesabhängigen Warmwasserbedarfe berücksichtigt.

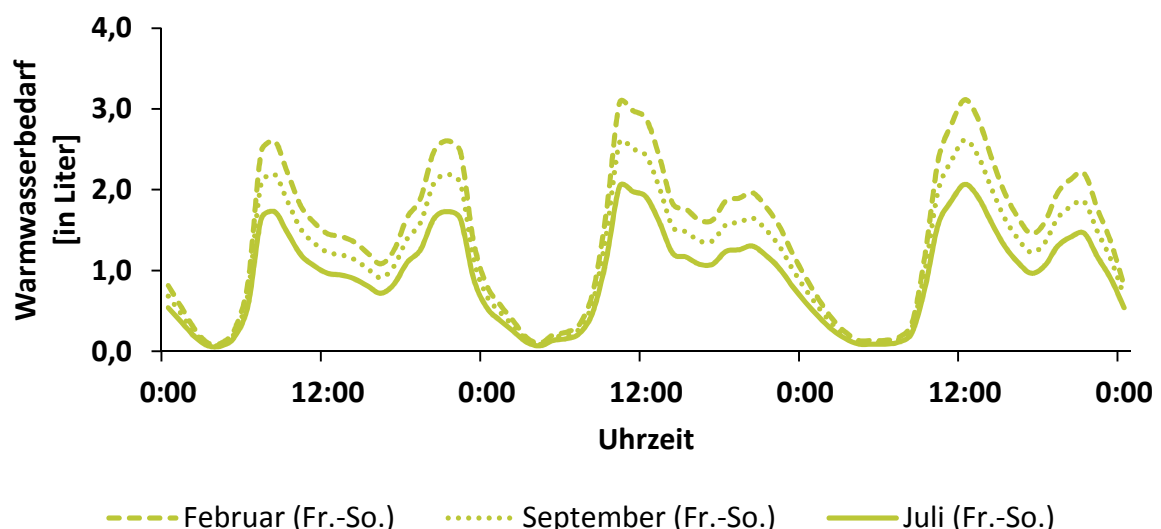
Tab. 17: Normierter Tages-Faktor des Warmwasserbedarfs.

Tagestyp	Werktage (Mo-Fr)	Samstage	Sonntage
Tages-Faktor	0,97	1,05	1,12

Weiterhin werden die mit den Tages-Faktoren gewichteten Profile, entsprechend des betrachteten Zeitraums, mit den Monats-Faktoren $[f_m]$ aus Tab. 18 multipliziert und auch die saisonalen Unterschiede (klimatische Bedingungen und Belegung) des Warmwasserbedarfs berücksichtigt.

Tab. 18: Normierter Monats-Faktor (f_M) des Warmwasserbedarfs.

Monat	Jan	Feb	Mrz	Apr	Mai	Jun	Jul	Aug	Sep	Okt	Nov	Dez
Monats-Faktor	1,12	1,13	1,12	1,02	1,04	0,94	0,75	0,90	0,95	0,90	1,05	1,08



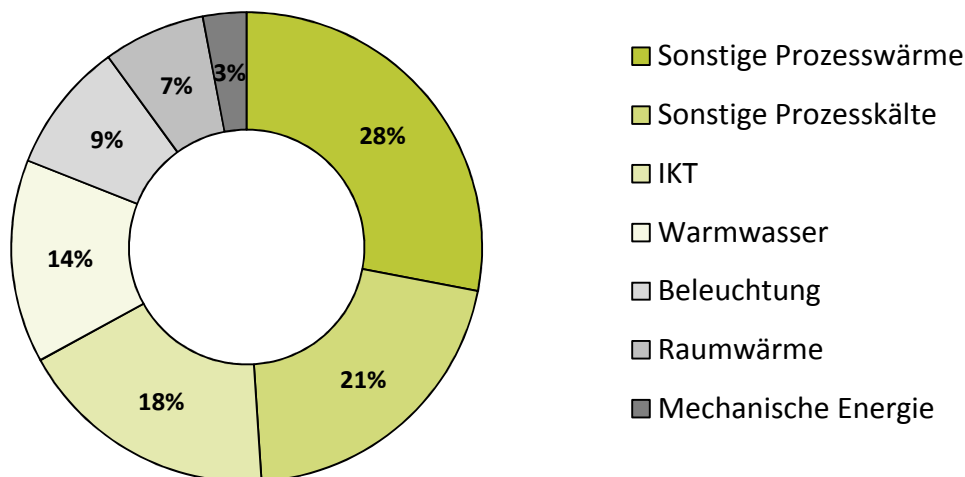
Grafik: Norbert Krauß
Daten: VDI 6002

Abb. 30: Beispiel eines Warmwasserlastprofils gemäß dem Verfahren der VDI 6002

Für die Berechnung der stündlichen Energiebedarfe wird der stündliche Warmwasserbedarf in Formel [26] eingesetzt. Abschließend werden die modifizierten Profile mit dem durchschnittlichen Tagesbedarf an Warmwasser multipliziert. Der durchschnittliche Warmwasserbedarf je Tag wird aus dem gesamten Warmwasserbedarf aller betrachteten Haushalte (vgl. Kapitel 4.2), geteilt durch 365, ermittelt. Als Ergebnis erhält man Warmwasserlastprofile wie sie beispielhaft in Abb. 30 abgebildet sind.

4.3 Stromverbrauch privater Haushalte

Der Stromverbrauch der privaten Haushalte macht rund 20 % des privaten häuslichen Energieverbrauchs aus und lag 2011 bei 136,7 TWh (BMWi 2017). Dies beinhaltet den Energieverbrauch für elektrische Haushaltsgeräte, für Beleuchtung sowie für die Bereitstellung von Raumwärme und Warmwasser (RWI 2012, BMWi 2017). Der durchschnittliche Stromverbrauch je Einwohner lag 2011 bei rund 1.672 kWh (BMWi 2017). Hiervon entfielen 21 % bzw. 348 kWh, auf die Bereitstellung von Raumwärme und Warmwasser (Abb. 31). Ohne den Stromverbrauch für Heizenergie und Warmwasser, die bereits in den Abschnitten 4.1 und 4.2 behandelt wurden, verbleiben 1.324 kWh je Einwohner bzw. 2.677 kWh für einen durchschnittlichen Haushalt mit etwa zwei Personen in Deutschland (DESTATIS 2017a).



Grafik: Norbert Krauß
Daten: BMWi 2011

Abb. 31: Aufteilung des Stromverbrauchs der privaten Haushalte nach Anwendungszwecken für das Jahr 2011.

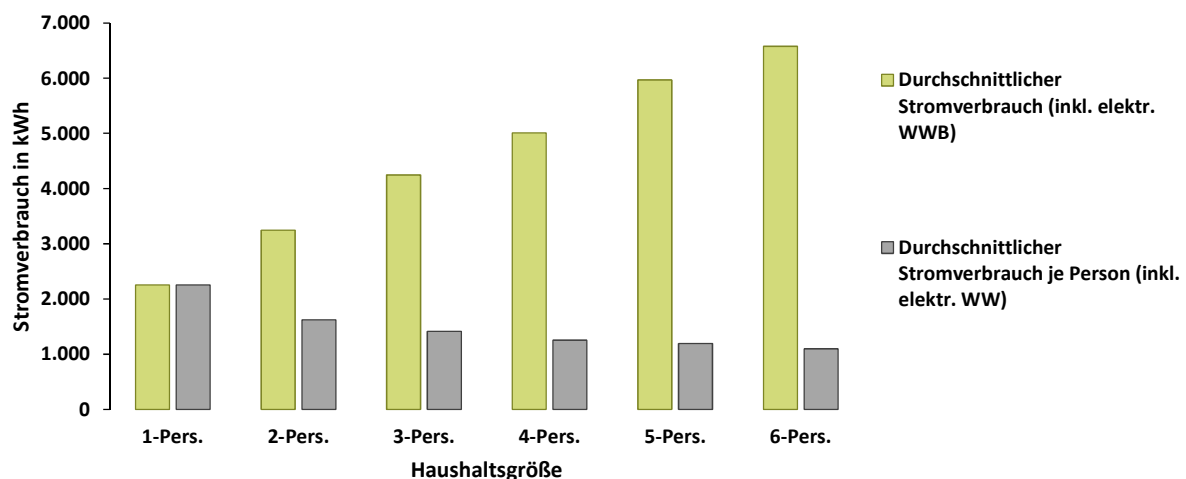
4.3.1 Einflussfaktoren

Der Stromverbrauch bzw. die Nachfrage nach Strom wird wie der Warmwasserkonsum durch Bedürfnisse hervorgerufen. Zu diesen Bedürfnissen gehören z. B. Essen (Kochen), Sauberkeit (Staubsaugen), Unterhaltung (Musik, Fernsehen) und ein angenehmes Wohnumfeld (Raumtemperatur, Helligkeit). Die Intensität der Bedürfnisse wird durch sozio-

demografische Merkmale (z. B. Alter, Geschlecht, Einkommen, Haushaltsgröße, Bildung), institutionelle Regelungen (z. B. Normen, Gesetze und Grenzwerte) und makrosoziale Parameter (z. B. Wohlstandsniveau, verfügbare Technik, kulturelle Normen und Leitwerte) beeinflusst (Abrahamse, W. & Steg, L. 2009, Sonnberger, M. & Zwick, M. M. 2016).

Verbunden mit diesen Bedürfnissen sind Aktivitäten (z. B. Waschen, Kochen, usw.), die zur Befriedigung der Bedürfnisse durchgeführt werden. Weiterhin werden zur Erfüllung der Bedürfnisse Hilfsmittel (elektrische Geräte und technische Anlagen) eingesetzt. So werden z. B. zur Befriedigung des Bedürfnisses nach Sauberkeit Staubsauger, Wasch- und Spülmaschinen und diverse andere Geräte eingesetzt, die beim Einsatz Strom verbrauchen. Folglich wird der Stromverbrauch eines privaten Haushaltes durch die Intensität seiner Bedürfnisse und die Art, die technischen Möglichkeiten sowie den Umfang (u. a. Häufigkeit) seiner Bedürfnisbefriedigung beeinflusst.

Zur Identifizierung zentraler Einflussfaktoren und deren Bedeutung wurden in einer Vielzahl an Untersuchungen der Stromverbrauch privater Haushalte und deren sozioökonomische Merkmale analysiert. Eine zentrale Bedeutung nehmen hierbei die Merkmale Haushaltseinkommen, Größe der Wohnfläche, Alter der Bewohner/innen, Anwesenheit von Kindern und Jugendlichen sowie die Haushaltsgröße ein (Jones, R. V. & Lomas, K. J. 2015).



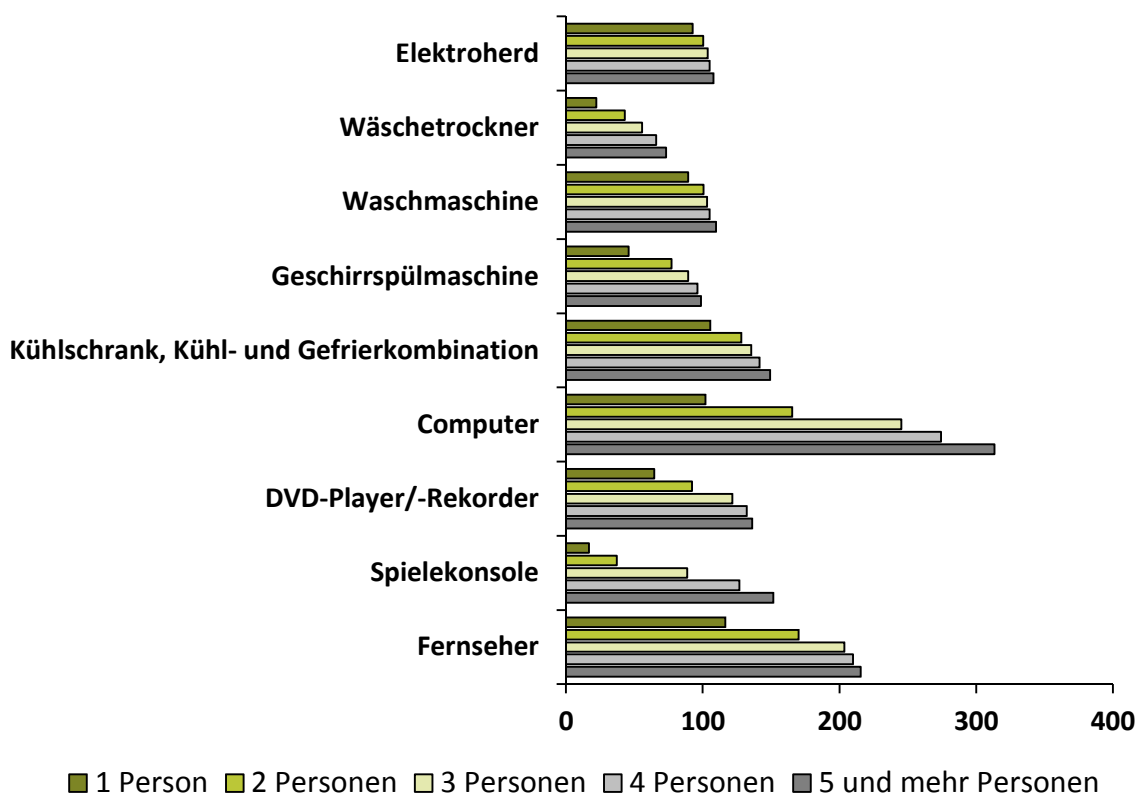
Grafik: Norbert Krauß
Daten: EnergieAgentur.NRW (2011)

Abb. 32: Stromverbrauch je Haushalt und Person in Abhängigkeit der Haushaltsgröße

Der Einfluss der Haushaltsgröße wird in mehreren Untersuchungen (z. B. Jones, R. V. & Lomas, K. J. (2015)) als bedeutender Einflussfaktor des Stromverbrauchs privater Haushalte hervorgehoben. Grundsätzlich gilt: steigt die Anzahl der Haushaltsmitglieder (Haushaltsgröße), so steigt i. d. R. auch der Stromverbrauch. Hierbei steigt der Stromverbrauch jedoch unterproportional an. D. h., mit jeder weiteren Person fällt der Anstieg des Strom-

verbrauchs geringer aus als zuvor. Dies bedeutet weiterhin, dass der Stromverbrauch je Person mit steigender Haushaltsgröße sinkt (vgl. Abb. 32).

Der unterproportionale Anstieg des Stromverbrauchs kann u. a. durch die Ausstattung der Haushalte mit Elektronikgeräten erklärt werden. So steigt die Anzahl von Haushaltsgeräten nicht im gleichen Umfang wie die Anzahl der Personen. D. h., ein Haushalt mit zwei Personen besitzt i. d. R. nicht die doppelte Anzahl an Kühlschränken, Waschmaschinen oder Elektroherden wie ein 1-Personen-Haushalt (vgl. Bürger, V. 2009). Je nach Haushaltsgerät bzw. Konsumgut kann der Ausstattungsgrad jedoch teils erheblich voneinander abweichen. So nimmt z. B. die Anzahl Weißer Ware (Kühl- und Gefrierschränke, Elektroherd, Geschirrspülmaschine, Waschmaschine, Wäschetrockner, usw.) in geringerem Maße zu, als z. B. Braune und Graue Ware (Unterhaltungs- und Informationselektronik) (Abb. 33).



Grafik: Norbert Krauß
Daten: DESTATIS 2013

Abb. 33: Anzahl ausgewählter Haushaltsgeräte je 100 Haushalte in Deutschland

Der vielfach beobachtete Zusammenhang zwischen Wohnungsgröße und Stromverbrauch wird in den Untersuchungen mehrheitlich auf den Zusammengang zwischen Haushaltsgröße und Wohnungsgröße zurückgeführt (FrondeI, M. & Ritter, N. 2012, Jones, R. V. & Lomas, K. J. 2015). Bürger, V. (2009) führt weiterhin auch das Haushaltseinkommen und die Ausstattung an, die mit der Wohnungsgröße und dem Stromver-

brauch in Zusammenhang stehen. Trotz der komplexen Wirkungszusammenhänge zwischen den Merkmalen Haushaltsgröße, Wohnungsgröße, Haushaltseinkommen sowie Ausstattung mit elektrischen Haushaltsgeräten und dem Stromverbrauch führen die Recherchen zu der Schlussfolgerung, dass die Berechnung des Strombedarfs in ausreichend genauem Maße anhand der Haushaltsgröße erfolgen kann.

4.3.2 Methoden zur Ermittlung des Strombedarfs privater Haushalte

Zur Ermittlung von Stromverbräuchen bzw. des Strombedarfs privater Haushalte stehen mehrere Methoden zur Verfügung. Häufig Anwendung finden hierbei Berechnungsmethoden, die auf empirischen Messungen von Stromversorgern bzw. der Auswertung von Stromrechnungen im Rahmen von Konsumentenbefragungen beruhen (EnergieAgentur.NRW 2011, Frondel, M. *et al.* 2011, 2013, EnergieAgentur.NRW 2015, Frondel, M. *et al.* 2015). Für die Berechnung des Strombedarfs werden die zugrunde liegenden Daten mittels statistischer Analysen sowie die Zusammenhänge zwischen dem real gemessenen Stromverbrauch und z. B. haushalts- oder personenbezogenen Charakteristika, abgeleitet.

Ein weiterer Ansatz ist die Berechnung auf der Grundlage statistischer Daten zur Geräteausstattung privater Haushalte. Durch Informationen zur Geräteausstattung privater Haushalte entlang haushalts- oder personenbezogener Charakteristika (z. B. Haushaltseinkommen, Haushaltsgröße, usw.) und der Zuordnung spezifischer Energieverbräuche sowie Nutzungsdauern der Haushaltsgeräte kann der Strombedarf berechnet werden.

Die Qualität und Genauigkeit der Berechnungen beruht auf den zugrunde liegenden Ausgangsdaten, den Referenzgebieten und der Vergleichbarkeit mit den Untersuchungsgebieten. Problematisch bei beiden Berechnungsmethoden ist, dass eine Betrachtung weniger oder einzelner Haushalte zu starken Abweichungen führen kann, da sich Charakteristika der betrachteten Haushalte stark von den zugrunde liegenden durchschnittlichen Charakteristika abweichen. Mit zunehmender Anzahl der betrachteten Haushalte im Untersuchungsraum sinkt die Abweichung. Ein ebenfalls wichtiges Kriterium ist die Aktualität der zugrunde liegenden Daten. Insbesondere durch technische Innovationen und der Weiterentwicklung technischer Geräte können sich deren Energieverbräuche verändern. Auch die Ausstattung mit Elektrogeräten verändert sich über die Zeit. Auch wenn sich beide Aspekte vergleichsweise nur langsam verändern, auf Grund der Lebensdauer von Geräten, ist die Datenaktualität zu berücksichtigen.

Für die Arbeit sind grundsätzlich beide Methoden denkbar. Es ist jedoch zu berücksichtigen, dass bei beiden Methoden mit Abweichungen zu rechnen ist, da die strukturellen Charakteristika der Ausgangsdaten und den Untersuchungsgebieten voraussichtlich voneinander abweichen. Dies kann z. B. die Altersstruktur der Haushalte, der Ausstattungs-

grad sowie weitere Charakteristik betreffen. Wie stark die Abweichungen sind, ist nur schwer abzuschätzen.

4.3.3 Ansätze und Konzepte zur Modellierung von Lastprofilen privater Haushalte

Wie bereits eingangs in Kapitel 2.3 dargelegt, gibt es mehrere Methoden zur Erzeugung von Lastgängen privater Haushalte. Diese können in die übergeordneten Methoden Top-down und Bottom-up unterteilt werden. Nachfolgend sollen diese anhand ausgewählter Ansätze untersetzt werden. Zunächst werden Ansätze die der Top-down-Methodik folgen vorgestellt. Im Anschluss wird auf Ansätze der Bottom-up-Methodik eingegangen.

Top-down-Ansatz

Das Standardlastprofil-Verfahren des VDEW (SLP)

Das Standardlastprofil-Verfahren wurde ursprünglich für den VDEW (heute BDEW) von der Brandenburgisch Technischen Universität in Cottbus (BTU) (Meier, H. *et al.* 1999) entwickelt. Das synthetische Lastprofil beschreibt dabei das kollektive Verhalten, also die Synthese vieler einzelner Lastgänge, einer größeren Anzahl vergleichbarer Endverbraucher, hier z. B. das der Haushaltskunden. Mit Hilfe synthetischer Lastprofile ist es somit möglich, ohne aufwendige bzw. kostenintensive Einzelmessungen das dem Verbraucher entsprechende, durchschnittliche Lastprofil zuzuordnen um damit das erwartete Verbrauchsverhalten abzubilden. Synthetische Lastprofile werden von den EVUs vor allem für die Prognose zukünftiger Energiebedarfe verwendet. Entwickelt wurden die synthetischen Lastprofile für eine große Anzahl an Abnehmern, was zur Folge hat, dass bei einer geringen Anzahl zu prognostizierender Verbraucher die Unsicherheit der Prognose steigt. Ausschlaggebend hierfür sind die sehr unterschiedlichen Verbrauchsverhalten, die bei einer niedrigen Anzahl an Verbrauchern stärker zum Tragen kommen.

Referenzlastprofil-Verfahren des VDI

Das Referenzlastprofil-Verfahren (VDI 4655) (VDI 2008) des Vereins Deutscher Ingenieure (VDI) ist ein Verfahren, das zur Bilanzierung von Kraft-Wärme-Kopplungs-Anlagen entwickelt wurde. Mit Hilfe der hinterlegten Referenzlastprofile kann der jahres- und tageszeitliche Energieeinsatz privater Haushalte modelliert werden. Ziel der VDI 4655 ist es, die Wirtschaftlichkeit von KWK-Anlagen in Wohnbauten zu ermitteln. Hierzu stehen Referenzlastprofile für zehn Typtage zur Verfügung. Ein Typtag steht dabei für einen Tag, der sich aus den drei Kriterien Wochentag (Werk- oder Sonn-/Feiertag), Bedeckungsgrad (heiter, bewölkt) und der Jahreszeit (Sommer, Übergang und Winter) zusammensetzt. Die in der VDI 4655 vorliegenden Lastprofile sind das Ergebnis von Leistungsmessungen vergangener Versorgungsperioden und stammen von fünf Einfamilienhäusern sowie drei Mehrfamilienhäusern mehrerer Standorte. Für Ein- und Mehrfamilienhäuser stehen je-

weils separate Referenzlastprofile zur Verfügung. Die Referenzlastprofile für Einfamilienhäuser liegen als 1-Minutenwerte und bei Mehrfamilienhäusern als 15-Minutenwerte vor.

Bottom-up-Ansatz

Synthetischer Lastprofile nach Pflugradt und Muntwyler

Für die Erstellung eines Lastprofils simulieren Pflugradt und Muntwyler das Verhalten von Haushalten auf Basis deren Bedürfnisse. Hierzu greifen Pflugradt und Muntwyler auf ein Verhaltensmodell aus der Psychologie zurück (Pflugradt, N. & Muntwyler, U. 2017). Durch die Simulation des Verhaltens der Bewohner/innen können die Zeitpunkte der Aktivierung einzelner Geräte und damit sowohl die Summenlast als auch die einzelnen Gerätelastgänge berechnet werden. Die zeitliche Auflösung ist frei einstellbar, Standard ist eine Minute. Basierend auf diesem verhaltens-/bedürfnisorientierten Ansatz können detaillierte Lastmodellierungen erfolgen, nachteilig hingegen ist der hohe Daten- und Zeitbedarf, um einen Haushalt im Detail zu modellieren (Pflugradt, N. & Muntwyler, U. 2017). Darüber hinaus lassen sich größere Gebiete bzw. eine große Anzahl an Haushalten nur mit erheblichem Aufwand modellieren. Für die Erstellung wurde der Load-Profile-Generator (LPG) erstellt, der auch zum Download zur Verfügung steht.

Synthetischer Lastprofile nach Fischer et al.

Die synthetischen Lastprofile von Fischer, D. *et al.* (2015) basieren auf Nutzungswahrscheinlichkeiten einzelner elektrischer Geräte, deren Nutzungsdauer und Nutzungshäufigkeit. Des Weiteren werden die sozioökonomischen Faktoren Haushaltgröße, Alter, Familienstatus, Gebäudetyp und berufliche Verhaltensmuster bei der Erstellung der Lastprofile berücksichtigt (Fischer, D. *et al.* 2015). Anhand dieser Faktoren wird insbesondere die Ausstattung der Haushalte mit Elektrogeräten bestimmt. Durch den Leistungsbezug der einzelnen Geräte, deren Nutzungsdauer und Häufigkeit, kann der elektrische Energieverbrauch und dessen Lastgang ermittelt werden. Die zeitliche Auflösung der so erzeugten Lastprofile liegt bei einer Stunde. Eine Vielzahl an Modellen folgt der Bottom-up-Methodik, vergleichbar der hier vorgestellten Methodik wie Fischer, D. *et al.* (2015).

4.3.4 Berechnung und Modellierung des Stromverbrauchs privater Haushalte im Modell

Nachfolgend wird der im Modell verwendete Berechnungsansatz zur Berechnung des Strombedarfs privater Haushalte und dessen zeitlicher Verlauf (Lastprofil) vorgestellt. Zunächst wird auf die Berechnung des Strombedarfs eingegangen. Im Anschluss daran wird die Modellierung des Lastprofils beschrieben.

Berechnung des Stromverbrauchs privater Haushalte

Die Berechnung des Strombedarfs der privaten Haushalte erfolgt auf Basis der Haushaltsgröße. Im Weiteren werden für die Berechnung des Strombedarfs haushaltsspezifische Stromverbrauchskennwerte benötigt. Entsprechende Kennwerte liegen z. B. aus Untersuchungen von (EnergieAgentur.NRW 2011, Frondel, M. *et al.* 2011, Gießhammer, R. *et al.* 2012, RWI 2012, BDEW 2013, Frondel, M. *et al.* 2013, EnergieAgentur.NRW 2015, Frondel, M. *et al.* 2015) vor. Hierbei ist jedoch zu berücksichtigen, dass Strom u. a. auch für die Bereitstellung von Heizwärme und Warmwasser verwendet und in einzelnen Untersuchungen nicht separat ausgewiesen wird. Die Berechnung für Heizwärme und Warmwasser erfolgt im Modell jeweils separat und ist somit im folgenden Berechnungsansatz für den Stromverbrauch abzugrenzen.

Aufgrund dessen werden Stromverbrauchskennwerte aus der Studie der Energieagentur Nordrhein-Westfalen (EnergieAgentur.NRW 2011) aus dem Jahr 2011 herangezogen. Die Kennwerte der Energieagentur Nordrhein-Westfalen unterscheiden zwischen dem Stromverbrauch mit und ohne elektr. Warmwasserbereitstellung und weisen jeweils separate Kennwerte für unterschiedliche Haushaltsgrößen aus (Tab. 19).

Tab. 19: Stromverbrauch privater Haushalte (nach EnergieAgentur.NRW (2011)).

Haushaltsgröße		Stromverbrauch			
Anzahl der Personen	inkl. elektr. WWB [in kWh/a]	mit elektr. WWB [in kWh/a]	ohne elektr. WWB		je Person [in kWh/Pers*a]
			[in kWh/a]	[in kWh/a]	
1-Pers.	2.256	2.818	1.798		1.798
2-Pers.	3.248	3.843	2.850		1.425
3-Pers.	4.246	5.151	3.733		1.244
4-Pers.	5.009	6.189	4.480		1.120
5-Pers.	5.969	7.494	5.311		1.062
6-Pers.	6.579	8.465	5.816		969

Wie in Abschnitt 4.3.1 bereits angeführt, steigt der Stromverbrauch mit der Haushaltsgröße (Tab. 19). Ebenfalls ersichtlich zeigen sich Unterschiede zwischen den Haushalten mit und ohne elektr. Warmwasserbereitung. Auf Basis der Stromverbrauchskennwerte für Haushalte ohne elektr. Warmwasserbereitung wurde der Stromverbrauch je Person ermittelt (Tab. 19). Für die weiteren Berechnungen im Modell wurde, ausgehend von den Stromverbräuchen der Haushalte nach Haushaltsgröße, die nachfolgende Formel [30] abgeleitet:

$$E_{Y,HH} = 1.801,1 * HH^{-0,661} \quad [\text{kWh/HH*a}] \quad \text{Formel [30]}$$

Mit Hilfe der Funktion kann der Stromverbrauch in Abhängigkeit der Haushaltsgröße ermittelt werden. Werden die Stromverbrauchskennwerte mit raumbezogenen Informationen zu den Haushalten kombiniert, kann der Stromverbrauch für ausgewählte bzw. abgegrenzte Untersuchungsgebiete ermittelt werden. Im Fall des vorliegenden Modells sind dies die einzelnen Strukturtypen der Wohnbebauung. Durch Unterschiede in den Haushaltsgrößen werden regionale Unterschiede in der Stromnachfrage berücksichtigt.

Modellierung des elektrischen Lastgangs im Modell

Für die Modellierung der Stromnachfrage privater Haushalte wird im vorliegenden Modell das Standardlastprofil-Verfahren des VDEW verwendet. Ausschlaggebend für die Wahl des SLP-Verfahrens sind der geringe Datenaufwand und deren einfache Anwendung sowie die Skalierung des Untersuchungsgegenstands (Stadt bzw. Stadtteile). Ansätze wie der Load-Profile-Generator (LPG) der Fachhochschule Bern stellen zwar eine interessante Alternative dar, sind jedoch aufgrund der benötigten sozioökonomischen Daten nur bedingt für ein konkretes Fallbeispiel, wie es in der vorliegenden Arbeit zum Einsatz kommt, geeignet, da die benötigten Daten nicht oder nur teilweise vorhanden bzw. verfügbar sind.

Zur Bilanzierung und Planung der bereitzustellenden elektrischen Leistung werden von Energieversorgungsunternehmen (EVU) sogenannte Standardlastprofile verwendet. Da sich die Untersuchungen im vorliegenden Modell auf mehrere Hundert Haushalte beziehen, ist von einer vergleichsweise geringen Unsicherheit bei der Verwendung des SLP-Ansatzes auszugehen.

Tab. 20: Jahreszeitliche Abschnitte im Standardlastprofil-Verfahren.

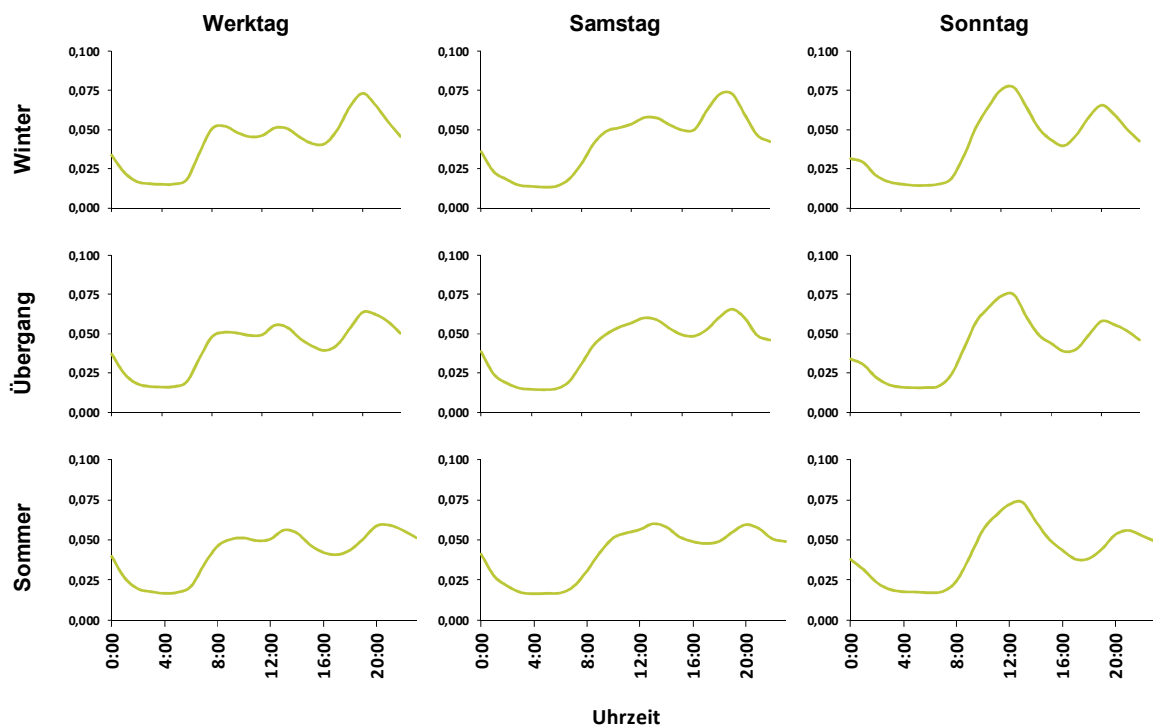
Zeitraum	Zeitraum (Datum)		
Winter	01. November	bis	20. März
Übergangszeit (Frühling)	21. März	bis	14. Mai
Übergangszeit (Herbst)	15. September	bis	31. Oktober
Sommer	15. Mai	bis	14. September

Die Lastprofile des VDEW liegen in viertelstündlichen Leistungskennwerten für die drei Typtage „Werktag“, „Samstag“ und „Sonntag“ vor. Zur Berücksichtigung saisonaler Witterungseinflüsse werden die Typtage nochmals in „Winter“, „Sommer“ und „Übergangszeit“ unterschieden (Tab. 20). Somit liegen insgesamt neuen Lastprofile für die Modellierung des jährlichen Leistungsbezuges vor (Abb. 34). Abb. 34 veranschaulicht die Unterschiede der einzelnen Lastprofile.

Die Unterschiede zeigen sich insbesondere in der Verschiebung der Lastspitzen, die an den Werktagen an den Abendstunden besonders ausgeprägt sind. Ausnahme bildet das Lastprofil im Sommer. Hier zeigt sich die verringerte Nutzung künstlichen Lichts aufgrund

der langen Helligkeit. Dies zeigt sich auch an den Lastprofilen für Samstag und Sonntag in der Saison „Sommer“. Das Lastprofil für den Samstag gleicht weitestgehend dem Profil des Werktages. Größere Unterschiede zeigen sich hingegen im Lastprofil des Sonntags. Hier liegen laut der SLP zwei ausgeprägte Lastspitzen vor. Eine in den Mittagsstunden (12-13 Uhr) und eine etwas niedrigere Lastspitze in den Abendstunden (ca. 20-21 Uhr).

Da aufgrund von Datenverfügbarkeit und Berechnungsaufwand im Energiemodell mit stündlichen Kennwerten gearbeitet wird, werden zur Vereinheitlichung der Daten die viertelstündlichen Leistungskennwerte des SLP-Verfahrens in stündliche Kennwerte überführt. Hierzu wird für jede Stunde eines Typtages aus den vier Leistungskennwerten einer Stunde die mittlere Leistung $[P]$ berechnet.



Grafik: Norbert Krauß
Daten: Standardlastprofil H0

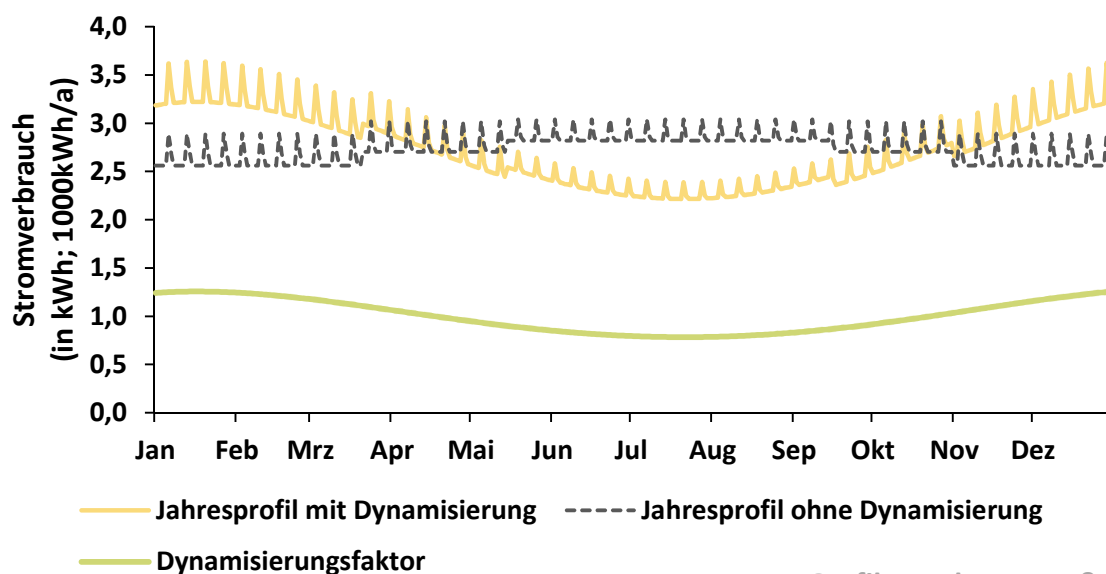
Abb. 34: Normierte Lastprofile für Haushaltskunden nach SLP-Verfahren

Zur Berücksichtigung der unterschiedlich ausgeprägten Anwesenheit der Bewohner/innen im Jahresverlauf, z. B. aufgrund von Urlaub, sowie zur Berücksichtigung eines erhöhten Energieverbrauchs in den Wintermonaten, z. B. aufgrund eines höheren Bedarfs an künstlichem Licht, werden die Leistungskennwerte der Typtage mittels Dynamisierungsfaktoren $[f_{dyn}]$ angepasst. Die Dynamisierungsfaktoren $[f_{dyn}]$ werden mittels eines Dynamisierungspolynoms (Polynomfunktion 4. Grades) berechnet. Durch Einsetzen der nummerierten Tage (n_d) in die Formel [31] kann für jeden Typtag eines Jahres

der Dynamisierungsfaktor berechnet werden (Abb. 35). Wie in Abb. 35 zu sehen ist, schwankt dieser zwischen 0,8 im Sommer und 1,3 im Winter (Formel [31]).

$$f_{Dyn} = x_1 * n_d^4 + x_2 * n_d^3 - x_3 * n_d^2 + x_4 * n_d + x_5 \quad \text{in [-]} \quad \text{Formel [31]}$$

Multiplikator	Zahlenwert
x1	-0,000000000392
x2	0,00000032
x3	0,0000702
x4	0,0021
x5	1,240000000005



Grafik: Norbert Krauß
 Daten: VDEW 1999 HO-Profil

Abb. 35: Stromverbrauch (in kWh, 1000 kWh/a) mit und ohne Dynamisierung sowie Dynamisierungspolynom

Durch Zuweisung der entsprechenden typtagabhängigen stündlichen Leistungsbezüge $[P_n]$ wird das Jahreslastprofil generiert. Zur Anpassung der normierten Lastprofile auf den erwarteten Jahresenergiebedarf $[E_Y]$ werden die zugrunde liegenden Leistungsbezüge $[P_n]$ mit dem Produkt aus $\left[\frac{E_Y}{1.000}\right]$ multipliziert. Anschließend werden die Leistungswerte $[P_n]$ der nummerierten Typtage mit den Werten des Dynamisierungspolynoms (f_{Dyn}) multipliziert.

$$f_{Dyn} = \frac{f_{Dyn} * P_n * E_Y}{1000} \quad \text{in [-]} \quad \text{Formel [32]}$$

Als Ergebnis erhält man einen Jahreslastgang, der dem Verlauf des Dynamisierungspolynoms folgt. Zum Vergleich enthält Abb. 35 auch den Jahreslastgang ohne Dynamisierung (gestrichelte graue Linie). Durch die Anwendung der Dynamisierungsfunktion werden die Leistungskennwerte in den Wintermonaten angehoben und in den Sommermonaten abgesenkt, wodurch der Mehrverbrauch in den Wintermonaten und der verringerte Verbrauch in den Sommermonaten simuliert wird. Zur Modellierung des Lastgangs wird der ermittelte Strombedarf mit den Stundenkennwerten des jeweiligen Tagesprofil $[P_n]$ und dem entsprechenden Dynamisierungspolynoms (f_{Dyn}) multipliziert.

5 Potenziale regenerativer Energien und Energiespeicher

Für die regenerative Energieversorgung von Städten und Dörfern stehen grundsätzlich eine Vielzahl unterschiedlicher Energiesysteme und -quellen zur Verfügung. Nicht alle Systeme und Quellen können an allen Standorten in Deutschland gleichermaßen gut genutzt werden. Windenergieanlagen z. B. werden im überwiegenden Maße im Umland und nur sehr selten in bebauten Gebieten installiert. Die Gründe hierfür sind klimatische, technische, rechtliche, wirtschaftliche und auch bauliche Restriktionen. D. h., dass die Potenziale regenerativer Energien ungleich verteilt sind. Insbesondere bei der Erschließung von regenerativen Energien innerhalb des bebauten Siedlungsraums kommt der Verfügbarkeit geeigneter Flächen und Quellen eine hohe Bedeutung zu.

In einer Vielzahl an Studien wurde die Nutzung solarer Strahlung und deren Beitrag für die Energieversorgung in Städten untersucht (ECOFYS 2004, Everding, D. & Kloos, M. 2007, Mangold, D. *et al.* 2007, Krauß, N. 2009, Solites *et al.* 2015, Bergner, J. *et al.* 2018) und auf deren hohes Potenzial für die städtische Energieversorgung verwiesen. Infolgedessen wird auch in der vorliegenden Arbeit die solare Energieversorgung aufgegriffen und untersucht.

Aufgrund der unsteten Verfügbarkeit der Solarenergie ergibt sich jedoch die Notwendigkeit, weitere regenerative Energieträger zu berücksichtigen. Hierzu bietet sich insbesondere die energetische Nutzung pflanzlicher und tierischer Stoffe an, die in Energieträger umgewandelt, gespeichert und nach Bedarf energetisch genutzt werden können.

In den nachfolgenden Kapiteln wird dahingehend auf die Potenziale von Solarenergie und Bioenergie sowie die Potenziale durch die Integration von Energiespeichern eingegangen (vergleiche Abb. 36). Weiterhin werden in den einzelnen Kapiteln zu Solarenergie (Kapitel 5.1), Bioenergie (Kapitel 5.2) und Energiespeicher (Kapitel 5.3) die Herleitung und Berechnungsansätze für das Modell dargelegt. Das Energieangebotsmodell ordnet sich, wie in Abb. 36 dargestellt, in das Gesamtmodell ein.

5.1 Aktive Nutzung direkter solarer Strahlungsenergie

Ziel des vorliegenden Kapitels ist es, ein Verfahren zur Berechnung der solarenergetischen Potenziale einer Gemeinde zu schaffen. Hierzu werden zunächst die Verfahrens- und Datengrundlagen dargelegt und im Anschluss daran folgt eine Beschreibung der Vorgehensweise und verwendeten Modellierungs-Algorithmen. Danach folgt die Berechnung der energetisch nutzbaren Solarstrahlung in Form von elektrischer und thermischer Energie. Abschließend wird auf die Anlagenkomponenten und die zugrunde gelegten Annahmen für die Berechnung der PV Energieerträge eingegangen.

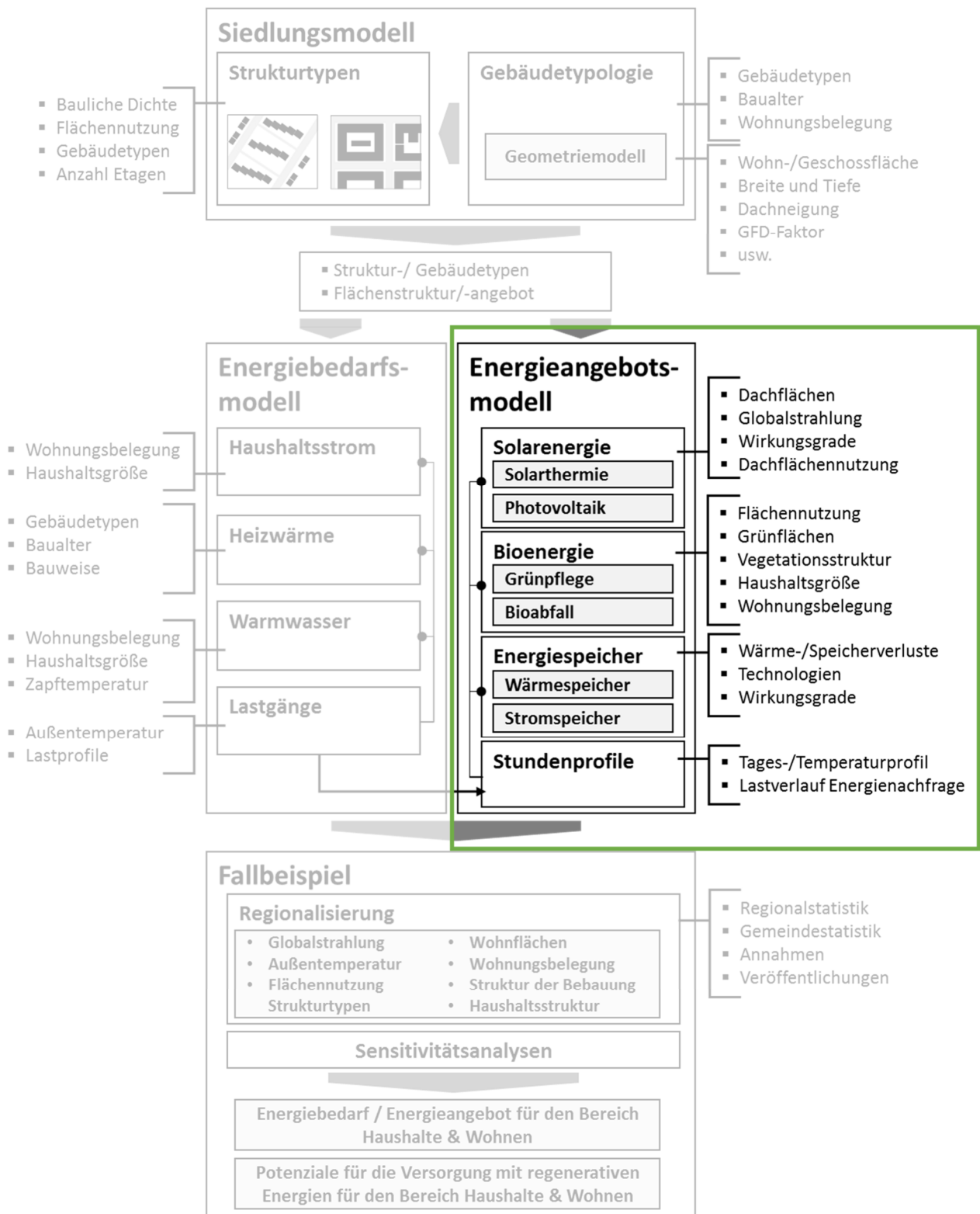


Abb. 36: Modellstruktur – Fokus Energieangebotsmodell (Eigene Darstellung)

5.1.1 Berechnung der solaren Strahlungsenergie

Für die Berechnung des solarenergetischen Potenzials stehen eine Vielzahl unterschiedlicher Rechenmodelle und Verfahren zur Verfügung. Hierbei kommen z. B. numerische Wettermodelle (Girodo, M. 2006, VDI 6007 2015), Berechnungsverfahren auf Basis von Satellitendaten (Mueller, R. W. *et al.* 2009, Amillo, A. *et al.* 2014, JRC 2017) oder Verfahren auf Basis bodengestützter gemessener Strahlungsdaten (CEC & DWD 2011, 2014) zum Einsatz. Ziel dieser Modelle und Berechnungsverfahren ist es, raumbezogene Daten zur Globalstrahlung zu ermitteln. Mittels der Globalstrahlungsdaten können anschließend weitere Berechnungen zur Nutzung der Solarstrahlung für solarthermische und/oder stromerzeugende Anlagensysteme durchgeführt werden. Dies wird mittels diverser Simulationsprogramme (TRNSYS, PV SOL, usw.) oder in vereinfachter Form mittels Tabellenkalkulationssoftware (Lödl, M. *et al.* 2010, ARGE Solarkataster Bamberg 2011) ausgeführt. Ein Vorteil von Simulationsprogrammen ist die Berechnung solarenergetischer Daten in hoher zeitlicher Auflösung (Minuten bis Stunden) während Verfahren, die sich einer Tabellenkalkulationssoftware bedienen, i. d. R. eine geringe zeitliche Auflösung von Tagen bis Jahre besitzen.

Grundlage für die Berechnung der solarenergetischen Nutzung bilden die im Auftrag des BBR durch den Deutschen Wetterdienst (DWD) und die Climate & Environment Consulting Potsdam GmbH (CEC) erstellten Testreferenzjahre (TRY). Hierbei handelt es sich um Datensätze zu ausgewählten meteorologischen Parametern, die für jede Stunde eines Jahres vorliegen. Grundlage der TRY-Datensätze bilden langjährige Mess- und Beobachtungsreihen, die für 15 Klimazonen an den jeweiligen Repräsentanzstandorten erhoben wurden. Die Einteilung der 15 Klimazonen erfolgte dabei anhand einer Faktoren- und Clusteranalyse. Jeder Klimazone und dem darin befindlichen Repräsentanzstandort sind mehrere Datensätze hinterlegt. Dies sind zum einen Datensätze, die auf den Beobachtungen der Jahre 1988 bis 2007 basieren, sogenannte „Gegenwarts-TRY“ und Datensätze, die auf Klimamodellen basieren und den Zeitraum 2021 bis 2050 abdecken („Zukunfts-TRY“). Darüber hinaus ist jedem „Gegenwarts-“ bzw. „Zukunfts-“ TRY je ein Datensatz mit mittleren klimatischen Verhältnissen sowie besonders kalten und besonders warmen Testreferenzjahre hinterlegt. Die Testreferenzjahre und deren Datensätze wurden so konzipiert, dass diese mit den vorherigen Testreferenzjahren von CHRISTOFFER, J. *et al.* (2004) vergleichbar sind.

Die Datensätze eines Testreferenzjahres enthalten für jede Klimazone u.a. Daten zu Bedeckungsgrad, Windrichtung, Windgeschwindigkeit, Lufttemperatur, Wasserdampfgehalt, relative Feuchte, direkte und diffuse Sonnenbestrahlungsstärke bezogen auf die horizontale Fläche sowie weitere Daten (CEC & DWD 2011, 2014).

Auf Basis der hinterlegten Datensätze in den Testreferenzjahren können die Solarenergiepotenziale berechnet werden. Für die Berechnung der Solarstrahlung auf ausgewähl-

ten Flächen wird die Bestimmung mehrerer Merkmale vorausgesetzt. Hierzu gehört die Sonnenposition des betreffenden Untersuchungsraums, die Sonnendeklination, die Zeitgleichung, die Sonnenhöhe (Elevation) und der Sonnenazimut. Für die Berechnung der Sonnendeklination, Zeitgleichung, Sonnenhöhe (Elevation) und des Sonnenazimut wird auf die in der VDI 6007 (2015) hinterlegten Algorithmus zurückgegriffen. Im Anschluss daran werden, basierend auf den Klimadaten der Testreferenzjahre des BBR (CEC & DWD 2011), die direkte und diffuse Sonneneinstrahlung auf eine beliebig geneigte und orientierte Fläche berechnet. Für die Berechnungen der direkten und diffusen Sonneneinstrahlung werden die Solarkonstante E_0 und Angaben zum Bedeckungsgrad bzw. zur Sonnenwahrscheinlichkeit benötigt. Die Solarkonstante E_0 wird ebenfalls mittels der VDI 6007 (2015) berechnet. Angaben zum Bedeckungsgrad sowie zur Sonnenwahrscheinlichkeit wurden aus den Datensätzen der Testreferenzjahre entnommen (CEC & DWD 2011, 2014). Die Berechnung erfolgt entlang einer stündlichen Betrachtung.

5.1.2 Energetische Nutzung direkter Solarstrahlung mittels Photovoltaik

Wie viel Energie mit Hilfe von Photovoltaikanlagen bereitgestellt werden kann, wird neben dem Standort und den damit verbundenen klimatischen Verhältnissen durch die Effektivität der Anlagentechnik und Anlagenkomponenten beeinflusst. So kann die auf Photovoltaikmodule einfallende solare Strahlung nur zum Teil in elektrische Energie umgewandelt und für die Energieversorgung verwendet werden. Grund dafür sind Verluste durch die verschiedenen Anlagenkomponenten. Hierzu gehören Verluste durch die Solarzellen, Wechselrichter und Leitungen. Für die Ertragsberechnungen werden nachfolgend die Kennwerte Modul-Wirkungsgrad und Anlagennutzungsgrad (Performance Ratio) von Photovoltaikanlagen eingeführt.

Wirkungsgrad von Photovoltaikmodulen

Der Wirkungsgrad von Solarzellen und Photovoltaikmodulen ist in den letzten Jahren kontinuierlich gestiegen. Lag der mittlere Wirkungsgrad von Photovoltaikmodulen mit mono- und multikristallinen Solarzellen im Jahr 2000 noch bei rund 11 %, so sind die Wirkungsgrade seitdem jährlich um rund 0,3 %-Punkte gestiegen und lagen im Jahr 2014 bei 15-16 % (Wirth 2015, S. 40 Abb. 31). Die Spitzenwerte lagen 2014 laut Wirth (2015) bei rund 20 %. Bei Modulen mit Dünnschichtsolarzellen werden Wirkungsgrade von rund 6-11 % erreicht. Die Spitzenwerte von Dünnschichtsolarmodulen lagen 2014 bei rund 12-13 % (Wirth 2015). Die Mehrheit der verkauften und installierten Photovoltaikmodule besitzen mono- oder polykristalline Solarzellen. Der Marktanteil von PV-Modulen mit monokristallinen Solarzellen liegt seit dem Jahr 2000 zwischen 30 - 40 % und bei PV-Modulen mit polykristallinen Solarzellen bei rund 45 - 55 %. Die restlichen, rund 10 %, entfielen 2014 auf Photovoltaikmodule mit Dünnschichtsolarzellen. Aufgrund der hohen Marktbedeutung von Photovoltaikmodulen mit mono- und polykristallinen Solarzellen wird für die

weiteren Berechnungen der PV-Erträge im Modell ein mittlerer Modul-Wirkungsgrad (η_{PV}) von 15 % angesetzt.

Performance Ratio (Anlagennutzungsgrad)

Die durch eine PV-Anlage bereitgestellte elektrische Energie wird zunächst durch den zuvor beschriebenen Wirkungsgrad der PV-Module begrenzt. Darüber hinaus kommt es durch vielfältige Effekte und Anlagenkomponenten zu Verlusten innerhalb einer PV-Anlage. Dies sind u. a. Verluste verursacht durch geringe Strahlungsintensitäten (Schwachlichtverluste), Verluste bei der Umwandlung von Gleichspannung zu Wechselspannung, Verluste durch die Kabelverbindungen sowie weitere Verluste unterschiedlichster Quellen, wie in Abb. 37 dargestellt.

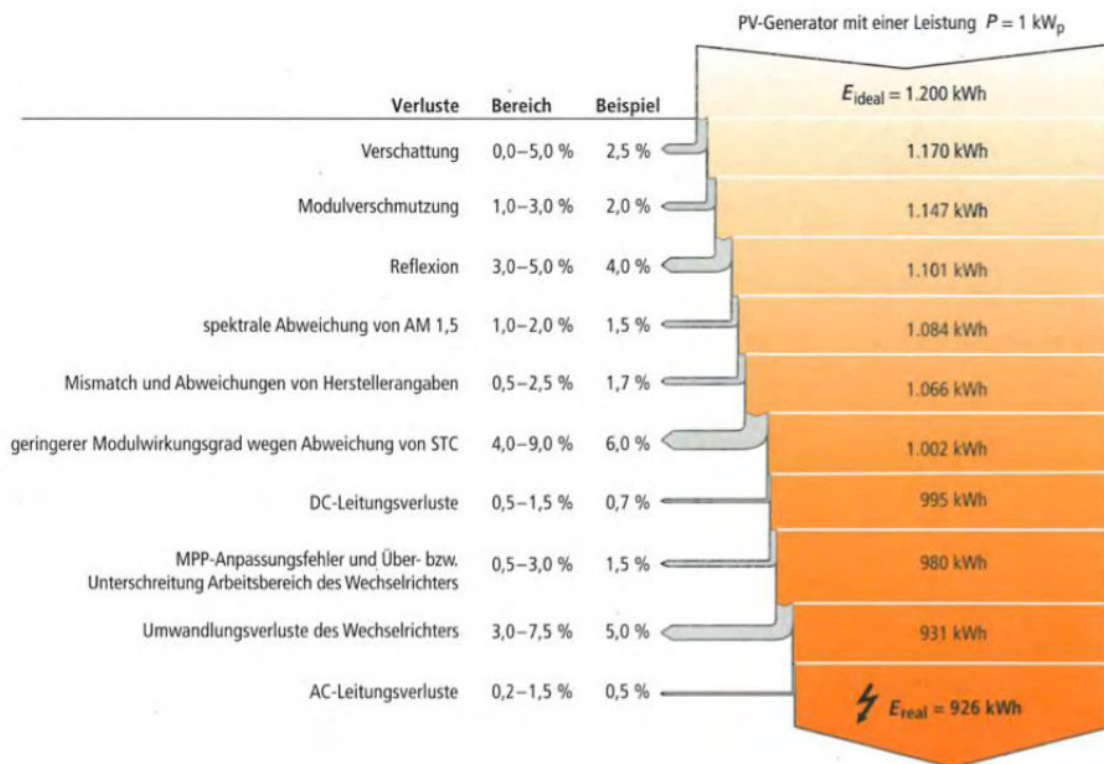


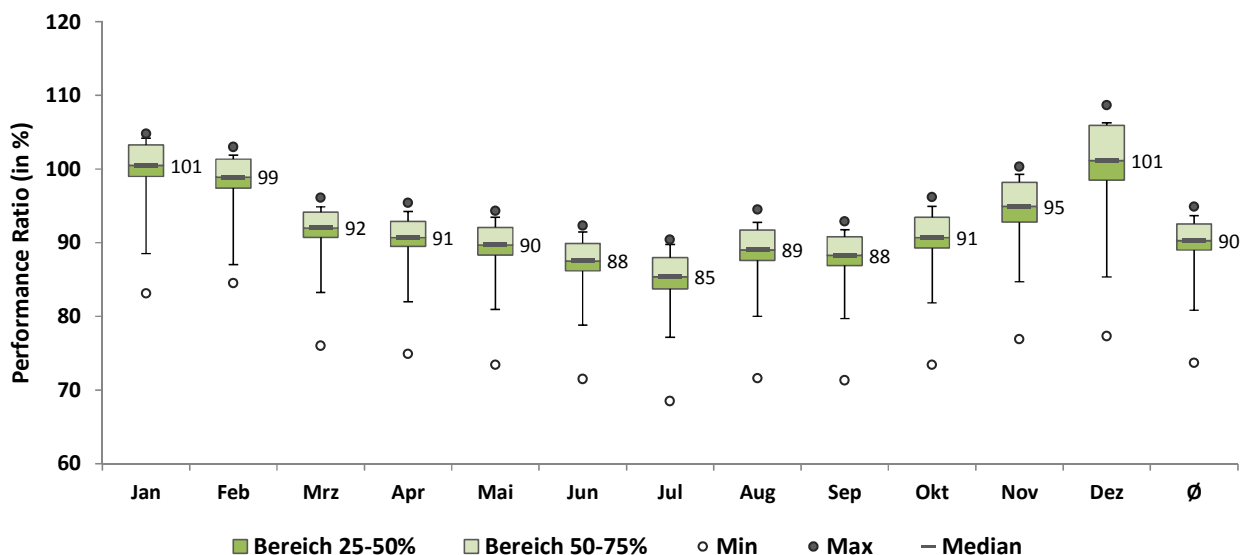
Abb. 37: Verluste innerhalb einer PV-Anlage. (Abbildung aus DGS (2013))

Zur Berücksichtigung der Verluste wird für die Berechnung der Anlagennutzungsgrad in Form der Performance Ratio (PR) herangezogen. Bei der Performance Ratio wird die erwartete solare Strahlungsenergie (E) mit dem tatsächlichen Ertrag verglichen (Wesselak, V. & Voswinckel, S. 2012). Der tatsächliche Ertrag ergibt sich aus dem Produkt der Einstrahlungsenergie in der Modulebene [G_M] in kWh pro m², der Gesamtfläche der PV-Module [A] in m² und dem Wirkungsgrad des Moduls [η_M]. Die PR wird entweder als einheitslose Größe oder als Prozentwert angegeben und kann nach DIN & VDE (2010) wie folgt beschrieben werden:

$$PR = \frac{E}{G_M * A * \eta_M} \quad \text{in \%} \quad \text{Formel [33]}$$

Durch Verbesserungen der Anlagentechnik hat sich die Performance Ratio der PV-Anlagen in den letzten zwei Jahrzehnten teils erheblich gesteigert. Demnach erreichten rund 60 % der Anlagen, die vor 1995 errichtet wurden eine PR von 60 - 75 % und rund 70 % der Anlagen, die zwischen 1995 bis 2001 errichtet wurden eine PR von 65 - 80 % (Decker, B. & Jahn, U. 1997, Clavadetscher, L. 2004). Anlagen, die in den letzten 5 – 10 Jahren errichtet wurden, erreichen, aufgrund verbesserter Komponenten, bei entsprechender Wartung und Installation Performance-Werte von rund 80 - 95 % (Wirth, H. 2011, 2012, 2013, 2014, Woyte, A. *et al.* 2014, Wirth, H. 2015).

Die Performance Ratio wird in der Regel als Jahresdurchschnittswert angegeben und verdeutlicht damit, wie gut die Anlage während des gesamten Jahres, die einfallende solare Strahlung nutzen bzw. in Energie umwandeln konnte. Während die durch die Anlagenkomponenten verursachten Verluste über das Jahr gesehen weitestgehend stabil bleiben, führen die über das Jahr sich verändernden klimatischen Bedingungen (Bewölkung, Schwachlicht, Niederschlag, Hitze und Kälte) zu unterschiedlich großen Verlusten. Um dies zu simulieren, können hierzu Performance Ratio Kennwerte, welche für die einzelnen Monate des Jahres vorliegen verwendet werden (Abb. 38).



Grafik: Norbert Krauß
Daten: Photon (2014)

Abb. 38: Monatswerte sowie der Jahresdurchschnitt der Performance Ratio von 174 Solaranlagen in 2014. (Eigene Auswertung; Datenbasis Photon International 2015)

Aus der Abb. 38 wird ersichtlich, dass die PR-Werte in den Wintermonaten Dezember bis Februar am höchsten sind und hin zu den Sommermonaten kontinuierlich abnehmen. Während in den beiden Monaten Januar und Dezember PR-Werte von 100 % erreicht

werden, sinken die PR-Werte bis zum Monat Juli auf ein Minimum von etwa 85 % ab und steigen dann wieder bis zum Monat Dezember an. Im Jahresdurchschnitt liegt der PR-Wert bei rund 90 %.

Da es sich bei den hier dargelegten PR-Werten um Messungen von Testanlagen, die einer regelmäßigen Beobachtung und Wartung unterliegen handelt, ist davon auszugehen, dass die PR-Werte über den Werten von Privat- bzw. Standardanlagen unter realen Rahmenbedingungen liegen. Ein Vergleich mit verschiedenen Untersuchungen und Auswertungen zur Performance von Photovoltaikanlagen bestätigt diesen Eindruck. Die Performance einer PV-Anlage wird dabei insbesondere durch die Effekte der Modulerwärmung in den Sommermonaten und die geringe Strahlungsintensität in den Wintermonaten (aufgrund vermehrter Bewölkung) beeinflusst. Des Weiteren tragen auch Verschattung, Verunreinigung und Bedeckung durch Schnee unter realen Bedingungen zu einer Verringerung der Anlagen-Performance bei. Als Folge dessen, werden im Jahresverlauf häufig Performance-Minima in den Winter- und Sommermonaten und Performance-Maxima in den Übergangsmontaten April, Mai, September und Oktober beobachtet (Decker, B. & Jahn, U. 1997, Rindelhardt, U. *et al.* 1998, Marion, B. *et al.* 2005, Makrides, G. *et al.* 2012). Für die Berechnungen werden dahingehend die Werte am unteren Ende des unteren Quartils (25-50 %) angesetzt.

5.1.3 Energetische Wärmenutzung direkter Solarstrahlung

Zur Bereitstellung von Wärme auf Basis solarer Strahlung werden nicht konzentrierte Solarkollektoren verwendet. Mit Hilfe der Solarkollektoren wird die solare Strahlung in Wärme umgewandelt und mittels eines Trägermediums zur Zwischenspeicherung und anschließend zum Ort der Wärmeabgabe transportiert. Zu einer Solarthermieanlage gehören der Solarkollektor, der Solarkreis für den Wärmetransport und ein Wärmespeicher. Am häufigsten werden Solarthermieanlagen für die Bereitstellung von Trinkwarmwasser eingesetzt. Weiterhin können Solarthermieanlagen auch zur Heizungsunterstützung verwendet werden (Kaltschmitt, M. *et al.* 2006). Ein hoher Anteil solarer Wärme an der Heizenergie erfordert jedoch eine große Fläche an Solarkollektoren, einen entsprechend großen Wärmespeicher sowie hohe baulich-energetische Eigenschaften des Gebäudes und kommen daher vergleichsweise selten in Deutschland vor (SAENA k.A.).

Die Erzeugung solarer Wärme mittels einer Solarthermieanlage ist mit Verlusten verbunden, so dass die, in der solaren Strahlung enthaltene Energie, nicht vollständig genutzt werden kann. Die Energieverluste sind u. a. die Folge von Reflexion sowie von Transmission am Kollektor, beim Transport des Trägermediums und der Zwischenspeicherung. Zur Beschreibung der Effizienz einer Solarthermieanlage werden u.a. Kollektorstufiger Wirkungsgrad, Nutzungsgrad und Systemnutzungsgrad ausgewiesen. Der Kollektorstufiger Wirkungsgrad ist das Verhältnis von abgeführter Wärme zur eingestrahlten Solarenergie auf einer definierten Bezugsfläche (i. d. R. die Kollektorfläche) (VDI 6002 2014). Darin enthalten sind

die optischen Verluste und Wärmeverluste, die am Kollektor auftreten. Neben dem Wirkungsgrad wird in der Literatur auch der Nutzungsgrad ausgewiesen. Dieser berücksichtigt neben den bereits genannten Verlusten weitere Aspekte beim realen Betrieb einer Anlage, so z. B. Verluste durch Stagnation, Verschmutzung oder Ausfälle aufgrund von Wartungsarbeiten. Typische Nutzungsgrade von Kollektoren liegen etwa bei 20-40 %. Hieraus ergeben sich Kollektorerträge von 200 bis 450 kWh/m²*a (Kaltschmitt, M. *et al.* 2006, Miehe, M. *et al.* 2013).

Der Systemnutzungsgrad wiederum ergibt sich aus der nutzbaren Wärmemenge, die nach Abzug aller Verluste (durch den Kollektor, den Transport im Solarkreis und die Zwischenspeicherung) an den Nutzer/in abgegeben wird, im Verhältnis zur eingestrahlt Solarenergie. Typische Werte für die gelieferte nutzbare Wärme liegen etwa bei 160-350 kWh/m²*a. Die resultierenden Systemnutzungsgrade liegen etwa bei 15-30 % (Kaltschmitt, M. *et al.* 2006, Schenke, A. & Croy, R. 2007, Deidert, J. *et al.* 2012). Die letztendlich abgegebene Nutzwärme und der Systemnutzungsgrad werden maßgeblich durch den Anwendungsfall (Trinkwassererwärmung, Heizungsunterstützung, Kombisystem) und das technische System beeinflusst. Nachfolgend wird die Berechnung des Kollektorstufigen Wirkungsgrads und des Systemnutzungsgrads dargelegt.

Kollektorstufiger Wirkungsgrad und Nutzungsgrad

Die auf einen Kollektor einfallende solare Strahlungsenergie kann nur zu Teilen in nutzbare Wärme umgewandelt werden. Verantwortlich hierfür sind Verluste infolge von Reflexion durch den Kollektor sowie Wärmeverluste (Kaltschmitt, M. *et al.* 2006). Die potenziellen Wärmeerträge durch den Kollektor können mittels des Kollektorstufigen Wirkungsgrads $[\eta]$ bestimmt werden (VDI 6002 2014). Dieser wird durch die Globalstrahlung $[E_G]$ in W/m², die Betriebstemperatur des Kollektors $[t_m]$ in °C und die Umgebungstemperatur $[t_a]$ in °C beeinflusst. Der (statische) Wirkungsgrad kann dahingehend für einen Zeitpunkt mit einer Differenztemperatur $[\Delta(t_m - t_a)]$ mittels der Formel [34] berechnet werden.

$$\eta = \eta_0 - \alpha_1 \frac{t_m - t_a}{G} - \alpha_2 \frac{(t_m - t_a)^2}{G} \quad \text{in [\%]} \quad \text{Formel [34]}$$

Der Wirkungsgrad wird darüber hinaus maßgeblich durch die Bauart und die verbauten Materialien des Kollektors beeinflusst. Kollektoren weisen dahingehend unterschiedliche Wärmeverlustkoeffizienten auf $[a_1 ; a_2]$ (Tab. 21). Je höher die Wärmeverlustkoeffizienten sind, desto empfindlicher reagiert ein Kollektor auf eine Temperaturerhöhung.

Tab. 21: Typische Kennwerte für einzelne Kollektorbauarten

Kollektor-Bauart	η_0	$\alpha_1 (W/(mK)^2)$	$\alpha_2 (W/(mK)^2)$	T (°C)
Flachkollektor	0,75-0,88	3,0-7,5	0,002-0,03	20-80
Vakuurröhrenkollektor (ohne Reflektor)	0,65-0,85	0,5-2,5	0,002-0,02	50-120
CPC-Vakuurröhrenkollektor (mit Reflektor)	0,65-0,85	0,5-2,5	0,002-0,02	50-120

QUELLE: VDI 6002 Blatt 1:2014

Bevor die solare Strahlung in Wärme umgewandelt werden kann, kommt es zu Verlusten aufgrund von Reflexion am Kollektor. D. h., dass nur ein Teil der ankommenden solaren Strahlung genutzt und in Wärme umgewandelt werden kann. In diesem Fall wird von optischen Verlusten bzw. dem optischen Wirkungsgrad gesprochen. Der optische Wirkungsgrad (Konversionsfaktor) bezeichnet den energetischen Anteil der solaren Strahlung, der durch den Solarkollektor in Wärme umgewandelt wird und an das Wärmeträgermedium abgegeben wird. Er ist der maximal erreichbare Wirkungsgrad des Kollektors und ist umso höher, desto geringer die Verluste durch Adsorption, Reflexion und Transmission sind. Den maximalen Wirkungsgrad kann ein Kollektor dann erreichen, wenn die Temperaturdifferenz zwischen der mittleren Temperatur des Kollektors $[t_m]$ und der Umgebungstemperatur $[t_a]$ dem Wert Null entspricht. Mit steigendem Temperaturunterschied erhöhen sich die Wärmeverluste (Leitungsverluste, Strahlungsverluste und Konvektionsverluste) und der Wirkungsgrad sinkt ab. Variiert man die Temperaturdifferenz, können Kennlinien der Wirkungsgrade für die unterschiedlichen Kollektoren erzeugt werden (Abb. 39). Hieraus ergibt sich der theoretische Verlauf des Wirkungsgrads je nach Temperaturdifferenz bei gleichbleibender Einstrahlung $[E_G]$. Der optische Wirkungsgrad $[\eta_0]$ schwankt je nach Bauart des Kollektors zwischen 65 % (Vakuurröhrenkollektor) und 95 % (Röhrenkollektor) (Tab. 21).

Die zuvor dargelegte Berechnung des Wirkungsgrads beruht auf einem statischen Ansatz und gibt lediglich den Wirkungsgrad für eine festgelegte Temperaturdifferenz (t_m) wieder. Eine Berechnung der sich wechselnden Temperaturdifferenz ist grundsätzlich möglich, erfordert jedoch umfangreiche Berechnungen und wird i. d. R. mit Simulationsprogrammen (T*Sol, PolySun, TRNSYS, usw.) durchgeführt. Eine umfassende Simulation entsprechender Temperaturverhältnisse steht jedoch nicht im Verhältnis der zugrunde liegenden Betrachtungsebene. Aufgrund dessen wird für die Berechnung ein durchschnittlicher Nutzungsgrad von 35 % angesetzt.

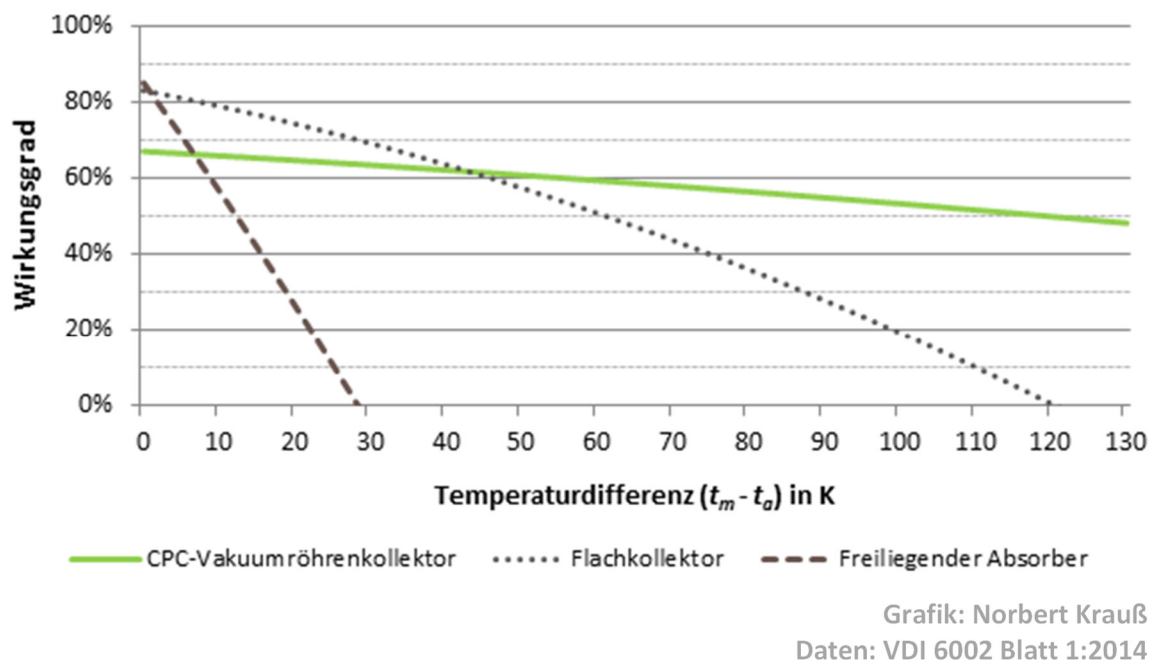


Abb. 39: Wirkungsgrad unterschiedlicher Kollektorbauarten, in Abhängigkeit der Temperaturdifferenz ($t_m - t_a$)

Wärmeverluste durch den Solarkreis

Bei der Erzeugung und Bereitstellung solarer Nutzwärme gehen bis zu 75 % der in der Strahlung enthaltenen Energie verloren (Kaltschmitt, M. *et al.* 2006). Ein Großteil der Verluste entsteht bereits bei der Umwandlung der Strahlungsenergie in Wärme durch den Kollektor. Hinzukommen Wärmeverluste durch den Transport der Wärme in den Leitungen vom Kollektor zum Speicher sowie durch den Speicher selbst. Die in den Leitungen (Solarkreis) auftretenden Wärmeverluste die beim Transfer vom Kollektorfeld zum Speicher in Hausanlagen entstehen bewegen sich zwischen 5-15 % der vom Kollektor abgegebenen Nutzwärme (Kaltschmitt, M. *et al.* 2006, Schenke, A. & Croy, R. 2007). Bei einer Wärmeversorgung per Nahwärmesystem kann, aufgrund der größeren Leitungslänge von leicht höheren Werten ausgegangen werden. Diese liegen bei rund 10-20 % des Kollektorertrags (Wolff, D. & Jagnow, K. 2011, Deidert, J. *et al.* 2012).

Für die Berechnungen von solarthermischen Hausanlagen wird ein mittlerer Wirkungsgrad des Solarnetzes von 90 % und für Solaranlagen, die an ein Nahwärmesystem angeschlossen sind, ein mittlerer Wirkungsgrad der Zuleitungen von 85 % angesetzt.

Wärmeverluste durch Wärmespeicher

Die Speicherverluste wiederum betragen rund 10-15 % der eingetragenen Wärme (Kollektor-Leitungsverluste). Diese sind maßgeblich von der Dämmung des Speichers abhängig. Auf die Wärmeverluste durch Wärmespeicher wird in Kapitel 5.3 separat eingegangen und soll hier nicht näher betrachtet werden.

5.1.4 Flächen für eine aktive solare Strom- und Wärmebereitstellung

In den vorausgegangenen Kapiteln wurden die anlagentechnischen Spezifika einer solaren Strom- und Wärmeerzeugung sowie deren Einfluss auf die zu erwartenden Strom- und Wärmeerträge dargelegt. Ein weiteres zentrales sowie begrenzendes Element einer solaren Energiegewinnung sind die zur Verfügung stehenden solarenergetisch nutzbaren Flächen. Grundsätzlich sind für eine aktive solare Strom- und Wärmeerzeugung innerhalb von Siedlungen Dachflächen geeignet. Freiflächen stehen innerhalb von Siedlungen i. d. R. nur in Ausnahmen zur Verfügung oder sind durch Bauten und Vegetation der Verschattung ausgesetzt. Im Fall der Photovoltaik kommen darüber hinaus prinzipiell auch Fassaden für eine solare Stromerzeugung in Frage. Mit einer solaraktiven Nutzung von Fassaden sind jedoch mehrere Restriktionen und Hürden verbunden. Dies sind u. a. die erhöhte Problematik einer Verschattung in Siedlungen, der schlechtere Ertrag aufgrund des ungünstigeren Einfallswinkels, ästhetische und konstruktive Anforderungen sowie allgemeine Fragen der Akzeptanz und der Wirtschaftlichkeit (Erfurt, I. *et al.* 2011). All diese Punkte führen bisweilen zu einer nur geringen energetischen Nutzung von Fassaden im Wohnungsbau. Aufgrund dessen werden in der vorliegenden Arbeit ausschließlich Dachflächen bei der Berechnung der solarenergetischen Potenziale berücksichtigt.

Weiterhin hat neben der Verfügbarkeit von Dachflächen deren Eignung entscheidenden Einfluss auf die solare Strom- und Wärmeerzeugung. So vermindern Aufbauten, Verschattung und Ausrichtung die letztendlich nutzbaren Dachflächen und damit das energetische Potenzial. Nachfolgend wird auf diese Punkte eingegangen.

Aufbauten und Verschattung

Dächer besitzen in unterschiedlichem Umfang Aufbauten, wie z. B. Gauben, Schornsteine, Antennen und Dachfenster. Diese Aufbauten können teils erhebliche Flächenanteile des Dachs einnehmen, die nicht für eine solare Nutzung zur Verfügung stehen. Hinzu kommt noch, dass die Aufbauten weitere Teile des Dachs zeitweise verschatten und somit nicht oder nur bedingt für eine solarenergetische Nutzung geeignet sind. Trotz einer Vielzahl an Untersuchungen zu solarenergetischen Potenzialen im europäischen Raum geben lediglich eine geringe Anzahl an Studien Auskunft über die nutzbaren Dachflächenanteile.

Hierzu gehören Untersuchungen von Todorov, M. (2015), Ludes, G. *et al.* (2013), Hegger, M. *et al.* (2012), Fradj, N. B. F. & Löwner, M.-O. (2012), Lödl, M. *et al.* (2010), Prinz, C. (2010), Haas, R. *et al.* (2002) sowie eigene Auswertungen (Krauß, N. 2009). Die in den Studien verwendeten Ansätze zur Abschätzung der solarenergetisch nutzbaren Dachfläche unterscheiden sich teils erheblich. In Prinz, C. (2010) und Krauß, N. (2009) wurden per Luftbildaufnahmen in ausgewählten Untersuchungsgebieten manuell die nutzbaren Dachflächen identifiziert. In Haas, R. *et al.* (2002) wurden europaweit Fallstu-

dien untersucht. In Hegger, M. *et al.* (2012) wurden anhand eines 3D Modells typische urbane Verschattungssituationen nachgebildet und hierauf aufbauend Reduktionsfaktoren erarbeitet. Fradj, N. B. F. & Löwner, M.-O. (2012) wiederum rekonstruieren anhand von Schatten in Luftbildaufnahmen Aufbauten von Dächern. Die in den Studien ausgewiesene nutzbaren Dachflächen differenzieren, mit Ausnahme von Hegger, M. *et al.* (2012), nicht zwischen PV und Solarthermie. Demnach schwankt der nutzbare Dachflächenanteil zwischen 60 % und 90 % für PV und Solarthermie. Fradj, N. B. F. & Löwner, M.-O. (2012) weisen in ihrem Aufsatz jedoch darauf hin, dass der von ihnen ermittelte nicht nutzbare Dachflächenanteil von 10 % tendenziell den unteren Wertebereich darstellt und daher mit höheren Abzügen zu rechnen ist. Für Solarthermie liegt der mittlere nutzbare Dachflächenanteil laut Hegger, M. *et al.* (2012) bei 70 % der solarenergetisch nutzbaren Dachfläche. D. h., dass die Flächen eine ausreichende Größe besitzen, keine Aufbauten enthalten und auch weitestgehend unverschattet sind. Die restlichen Flächen eines Dachs stehen aufgrund von Aufbauten (z. B. Gauben, Dachfenster, Schornsteinen, Antennen, usw.) und Verschattung nicht für eine solare Nutzung zur Verfügung. Bezugnehmend auf die zugrunde liegenden Studien wird für die Berechnung des Solarenergiepotenzials ein Minderungsfaktor von 20 % für PV und Solarthermie angesetzt. Demnach stehen 80 % der Dachfläche für eine aktive Solarenergienutzung zur Verfügung.

Solaranlagen, die auf Schrägdächern installiert werden, werden i. d. R. entsprechend der Neigung des Daches montiert. Anders hingegen verhält es sich bei Solaranlagen, die auf Flachdächern installiert werden. Diese werden i. d. R. mittels eines Gerüsts aufgestellt. Hierdurch kann die Ausrichtung und Neigung der Module bzw. Paneele optimal angepasst werden, was zu einer Steigerung des Energieertrags führt. Weiterhin dient die Aufrichtung der Solarmodule bzw. Panels der Selbstreinigung durch Regen und Schnee. Problematisch hingegen ist die mögliche gegenseitige Abschattung durch das Aufstellen der Module bzw. Panels, falls der Abstand zwischen den Reihen zu gering ist. Dies wiederum führt zu einer Reduktion des solaren Energieertrags.

Zur Vermeidung bzw. Minimierung der gegenseitigen Abschattung sollte der Abstand [SR_{Abs}] zwischen den Reihen so gewählt werden, dass der Bereich [x] (Abb. 40) bei niedrigem Sonneneinfallswinkel im Winter noch bestrahlt wird (Quaschnig, V. 2015). Zur Berechnung des erforderlichen Abstands zwischen den Reihen kann die Formel [35] herangezogen werden. Hierzu werden der Neigungswinkel [α] der Module bzw. Paneele, deren Länge [L] und der Sonnenwinkel [β] benötigt (VDI 6002 2014, Quaschnig, V. 2015).

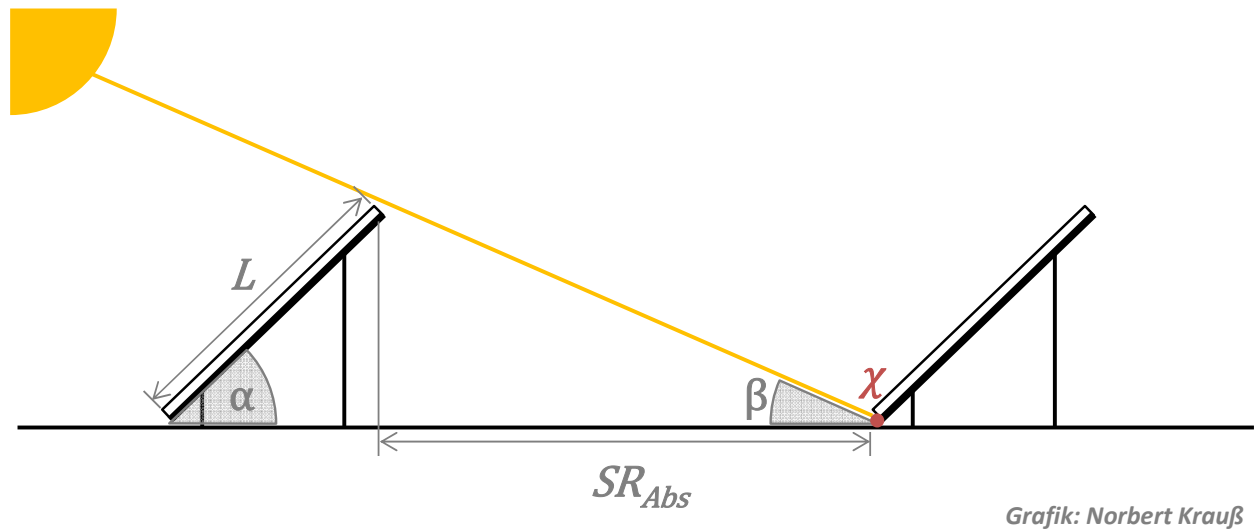


Abb. 40: Berechnungsgrundlagen bei aufgeständerten Solarmodulen bzw. Paneelen.

$$SR_{Abs} = L * \frac{\sin \alpha}{\tan \beta} \quad \text{in [m]} \quad \text{Formel [35]}$$

Geht man von handelsüblichen Solarmodulen bzw. Paneelen aus, kann für $[L]$ ein mittlerer Wert von 1,6 m (PV-Module) bzw. 2,1 m (Solar-Panels) angesetzt werden. Für PV-Module und Solar-Panels wird jeweils eine Breite von einem Meter angenommen. Weiterhin wird für den Sonnenwinkel $[\beta]$ in Anlehnung an VDI 6002 (2014) 15° angesetzt. Für den Neigungswinkel $[\alpha]$ wiederum sollte die Neigung mindestens 20° und maximal 50° betragen. Es ist jedoch abzuwägen zwischen optimaler Flächennutzung und optimalem Modul- bzw. Panelnutzung. Da bei Modulen und Panels mit einer Neigung unterhalb von 30° die Fähigkeit der Selbstreinigung vermindert wird und hierdurch die Ertragseinbußen durch Verunreinigung steigen, wird für Solaranlagen auf Fachdächern ein Aufstellwinkel von 35° angesetzt. Hinzukommt, dass in den Breiten Deutschlands Solaranlagen bei einem Neigungswinkel zwischen $30\text{-}35^\circ$ die höchsten Erträge erzielen.

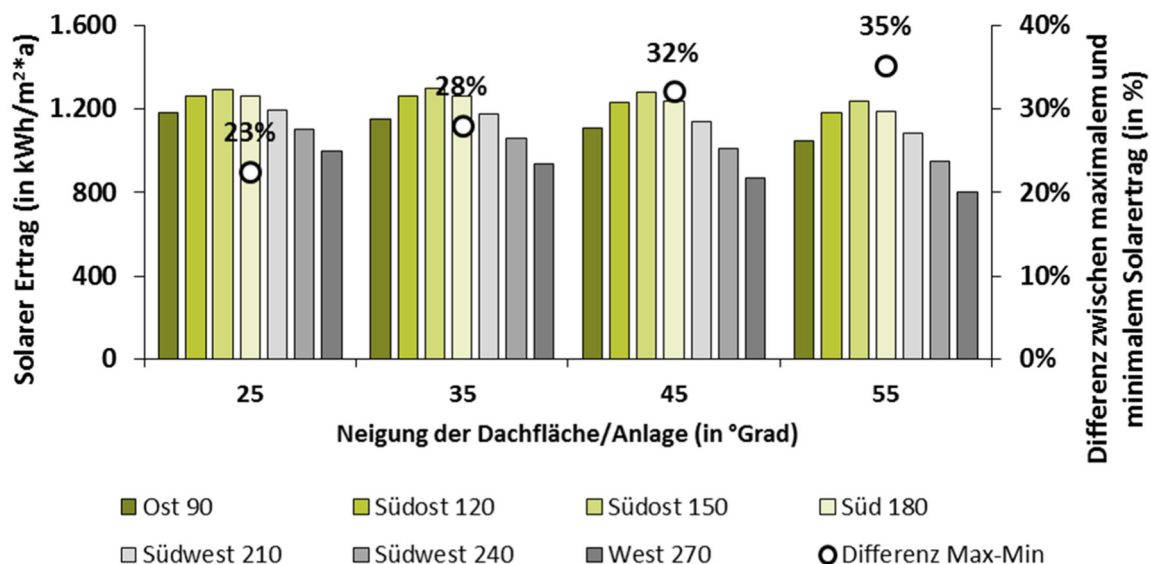
Unter diesen Annahmen stehen für das Aufstellen von PV-Modulen rund 22 % und für Solar-Panels rund 29 % der Fläche eines Flachdachs zur Verfügung. Dies wiederum entspricht einem installierten Verhältnis von 0,28 (PV) bzw. von rund 0,36 (Solarthermie) des Dachs. Diese Werte reduzieren sich weiterhin um den Anteil der mit Aufbauten überdeckten Dachflächen von 25 %. So dass für Flachdächer das Verhältnis von installierbarer Modul- bzw. Panelfläche zur Dachfläche $0,21 \text{ m}^2/\text{m}^2$ bzw. $0,27 \text{ m}^2/\text{m}^2$ beträgt. Prinz, C. (2010) wiederum geht von einem installierbaren Modulflächenverhältnis von 0,22-0,24 aus, was sich gut mit den eigenen Berechnungen deckt. Scheffler, J. (2002) geht in seinen Untersuchungen von einem Anteil von 40 % solarenergetisch nutzbarer Dachfläche

für das Aufstellen von PV-Modulen aus. ARGE Solarkataster Bamberg (2011) geht in ihren Berechnungen nach Abzug von Randabständen (Attika = 1,2 m), Einbauten (Oberlichter, Aufzüge, Lüftungsanlagen) und Verschattung sowie einem Modul-Neigungswinkel von 15° von einem nutzbaren Flächenanteil von 60 % und einem installierbaren Flächenverhältnis von 0,37 aus.

Ausrichtung und Neigung

Ausrichtung und Neigung von Solarthermie- und PV-Anlagen haben Einfluss auf die erzielbaren solaren Energieerträge. Die Ausrichtung und Neigung von Solarthermie- bzw. PV-Anlagen wird i. d. R. durch die Ausrichtung und Neigung des Dachs bestimmt, auf dem die betreffende Anlage errichtet wird. Eine Ausnahme hierbei bilden Flachdächer. Auf diesen können PV-Module und Solar-Panels aufgeständert und deren Neigung sowie Ausrichtung je nach Bedarf festgelegt werden (vgl. vorherigen Abschnitt „Aufbauten und Verschattung“).

Anlagen mit einer Ausrichtung nach Süden (180°) erzielen in Deutschland i. d. R. die höchsten absoluten Erträge. Weicht die Ausrichtung hingegen nach Osten oder Westen ab, so verringert sich bei sonst gleichen Bedingungen (Neigung, Fläche, usw.) der absolute Ertrag, den eine Solarthermie- oder PV-Anlage erzielen kann (vgl. Abb. 41). Die Unterschiede des solaren Ertrags können zwischen Maximum und Minimum um bis zu 35 % voneinander abweichen. Um dies zu berücksichtigen werden bei der Berechnung der solarenergetischen Potenziale Angaben zur Ausrichtung der Dachflächen eingebunden.



Grafik: Norbert Krauß

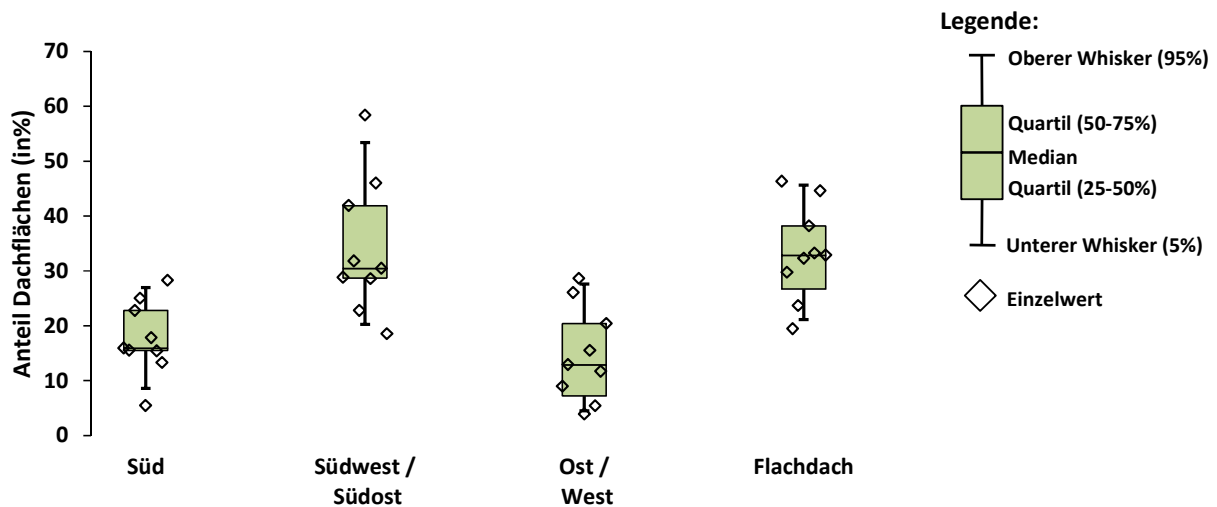
Daten: CEC & DWD; Eigene Auswertungen

Abb. 41: Solarertrag (in kWh/m²*a) in Abhängigkeit der Dachausrichtung und Dachneigung sowie die Ertragseinbußen aufgrund der Ausrichtung (in %)

In den Breitengraden Deutschlands kann eine PV-Anlage mit einer Ausrichtung nach Süden die höchsten Erträge bei einer Neigung von 30° bis 40° erzielen. Bei solarthermischen Anlagen liegt der optimale Neigungswinkel bei einer Ausrichtung nach Süden zwischen 30° und 60°. Entscheidend für die Wahl des Neigungswinkels ist neben einem möglichst hohen Ertrag, die mit der Solaranlage beabsichtigte Aufgabe. Soll mit der Solaranlage z. B. ein möglichst hoher Anteil des Warmwasserbedarfs gedeckt werden, dann können mit einem Neigungswinkel zwischen 30° und 40° die besten Ergebnisse erzielt werden. Soll die Solaranlage hingegen zur Heizwärmeversorgung genutzt werden, so ist ein Neigungswinkel von 40° bis 60° besser geeignet, da aufgrund der geringeren Einfallswinkel in den Wintermonaten ein höherer Ertrag erzielt werden kann. Hieraus wird ersichtlich, dass Ausrichtung und Neigung der Dachflächen eine zentrale Bedeutung besitzen. Trotz einer zunehmenden Fülle an Daten und Informationen rund um die gebaute Welt ist die Datenlage zur Ausrichtung und Neigung von Dachflächen bisher vergleichsweise gering oder nicht frei zugänglich. Durch den vermehrten Einsatz von geografischen Informationssystemen (GIS) und digitalen Datenbanken in den letzten Jahren wurden eine Vielzahl an Ansätzen (Blum, B. *et al.* 1996, Everding, D. & Kloos, M. 2007, Krauß, N. 2009, ARGE Solarkataster Bamberg 2011, Todorov, M. 2015, Mainzer, K. *et al.* 2017, Bergner, J. *et al.* 2018) und Daten zur Ermittlung von Solarpotenzialen (z. B. Solarkataster) und den hierfür relevanten Daten (Ausrichtung, Neigung, Verschattung, Aufbauten, usw.) erarbeitet. Diese sind jedoch i. d. R. nicht zugänglich oder nur eingeschränkt nutzbar.

Hinweise zur Ausrichtung können z. B. Energiepotenzialstudien für einzelne Gemeinden in Baden-Württemberg entnommen werden (Baur, M. *et al.* 2012, Hettich, S. *et al.* 2012, Hettich, S. & Rist, M. 2013, Weiß, N. & Krecher, M. 2014, badenova [Hrsg] 2015, Huber, P. & Gehring, M. 2015, Stöhr-Stojakovic, S. *et al.* 2015, Wagner, D. & Stöhr-Stojakovic, S. 2015, Baumgartner, S. & Krecher, M. 2016). In den Studien wurde mittels des Solarkatasters sowie Analysen mit GIS die Dachflächenausrichtung ermittelt (Abb. 42).

Aus den Untersuchungen geht hervor, dass die Aufteilung der Ausrichtungen (Ost/West, Südost/Südwest und Süd) der Dächer mit Dachneigung teils erheblich streuen. So bewegt sich der Anteil der nach Süden ausgerichteten Dachflächen zwischen 6 % und 28 %, die nach Südosten und Südwesten orientierten Dachflächen liegen zwischen 19 % und 58 % der gesamten geneigten Dachflächen. Die nach Osten und Westen ausgerichteten Dachflächen haben einen Anteil von 4 % bis 27 % der Dachflächen. Der Flächenanteil von Flachdächern beträgt rund 1/3 der gesamten Dachfläche. In den Untersuchungen wurden jedoch nicht zwischen Wohnbebauung, Industrie- und Gewerbebauten sowie Garagen und weiteren Gebäuden differenziert. Hierdurch erhöht sich tendenziell der Anteil der Flachdächer. Bei einer Betrachtung reiner Wohnbebauung ist somit mit höheren Werten geneigter Dachflächen und geringeren Anteilen an Flachdächern zu rechnen.

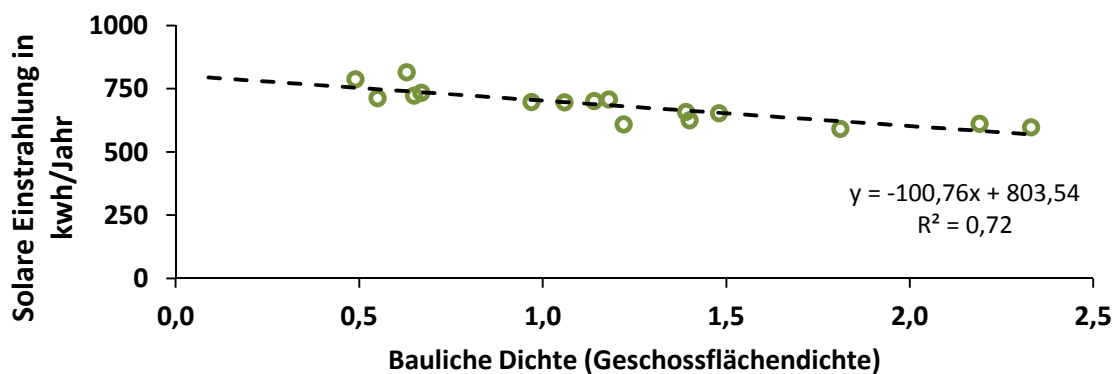


Grafik: Norbert Krauß
 Daten: Badenova (2012a, 2012b, 2013, 2014, 2015a-d, 2016)

Abb. 42: Bandbreite der Dachausrichtungen/Dachart und deren Flächenanteile

Bauliche Dichte und aktive Solarenergienutzung

Bereits im Kapitel 2.4.3 wurde auf den Einfluss der Bebauung auf die energetische Nutzung solarer Strahlung durch Photovoltaik- und Solarthermieranlagen verwiesen. Die Datenlage hierzu ist jedoch bisher begrenzt und nicht immer eindeutig. Die Mehrheit der recherchierten Untersuchungen beleuchtet diesbezüglich das Solarpotenzial bzw. den Einfluss baulicher Rahmenbedingungen auf Solaranlagen an Fassaden (Morganti, M. *et al.* 2017, Salvati, A. *et al.* 2017). Aufgrund der in Abschnitt 5.1.4 dargelegten Erläuterung wird dieser jedoch in der vorliegenden Arbeit nicht betrachtet. Darüber hinaus zeigt sich aber auch ein Zusammen zwischen den baulichen Gegebenheiten und der solarenergetischen Nutzung von Dachflächen (Sarralde, J. J. *et al.* 2015, Mohajeri, N. *et al.* 2016). Für die in der Studie von Mohajeri, N. *et al.* (2016) untersuchten Bebauungen zeigt sich, dass mit zunehmender baulicher Dichte, ein Absinken des Solarenergieertrags durch Verschattung einhergeht (Abb. 43). Auch wenn sich die Untersuchungen auf Bebauungen in Spanien beziehen und somit zum Teil abweichende Bauweisen sowie Baustandards gegenüber dem hier betrachteten Untersuchungsgebiets vorliegen, so kann dennoch von einem allgemeingültigen Zusammenhang ausgegangen werden.



Grafik: Norbert Krauß
Daten: Mohajeri, N., et al. (2016)

Abb. 43: Solarenergieeinstrahlung in Abhängigkeit der baulichen Dichte

5.1.5 Berechnung des PV- und Solarthermiepotenzial im Modell

Um das Solarenergiepotenzial für eine Gemeinde zu ermitteln werden, die zuvor beschriebene Methodik und die in Kapitel 3 erarbeiteten Gebäude- und Strukturtypen miteinander verknüpft. Mit Hilfe der ermittelten Daten zu den Dachflächen der einzelnen Gebäude- und Strukturtypen ist es möglich, für jeden der Strukturtypen das solarenergetische Potenzial zu berechnen. Hierzu sind mehrere Schritte durchzuführen und Annahmen zu treffen, die nachfolgend kurz dargelegt werden.

Verfügbare und solarenergetisch nutzbare Dachflächen

Die Berechnung der verfügbaren Dachflächen beruht auf der Berechnung der gesamten Dachfläche im Untersuchungsgebiet, wie in Kapitel 5.1.4 geschildert. Nachdem die Dachfläche ermittelt ist, werden Angaben zur Ausrichtung der Gebäude bzw. der Dachflächen benötigt. Liegen keine spezifischen Daten zum Untersuchungsgebiet vor, so sind Annahmen zu treffen. Hierzu kann auf die zuvor angeführte Fallstudienauswertung (Abb. 42) zurückgegriffen werden, die als Orientierung dient. Aufgrund der geringen Anzahl und der räumlich eingegrenzten Lokalisierung der Fallstudien auf Baden-Württemberg sind diese Daten jedoch nicht repräsentativ und daher mit hoher Unsicherheit behaftet. Nachdem spezifische Daten vorliegen oder Annahmen getroffen wurden, werden die Dachflächen um Dachaufbauten bereinigt. Hierzu werden die Dachflächen mit 0,75 Multipliziert (vergleiche Abschnitt „Aufbauten und Verschattung“).

Für Flachdächer sind darüber hinaus weitere Abschläge zu berücksichtigen, so dass für Flachdächer von einer nutzbaren Fläche von 15,4 % für PV bzw. 20,3 % für Solarthermie ausgegangen wird. Diesen Kennwerten liegt eine Neigung der Module bzw. Panels von

35° zugrunde. Übertragen auf die installierbare Modul- bzw. Panel-Fläche entspricht dies einem Flächenverhältnis von 0,2 m² (PV) bzw. 0,25 m² (Solarthermie) je m² Dachfläche.

Dichteeinfluss auf Energieertrag

Zur Berücksichtigung des Dichteeinflusses der Bebauung auf das verfügbare Solarenergiepotenzial wird auf die Untersuchung von Mohajeri, N. *et al.* (2016) zurückgegriffen. Hierzu werden aus den in Mohajeri, N. *et al.* (2016) veröffentlichten Ergebnissen die nachfolgende Formel [36] abgeleitet.

$$SR_{GFD} = -0,127 * GFD + 1,0127 \quad \text{in [\%]} \quad \text{Formel [36]}$$

Für die Berechnung wird die Geschossflächendichte (GFD) der erarbeiteten Strukturtypen in die Formel eingesetzt. Der daraus resultierende Wert stellt einen zusätzlichen Abschlagsfaktor dar, der mit der zusätzlich zum Reduktionsfaktor der Aufbauten von der Dachfläche abgezogen wird. Geht man z. B. von einer Geschossflächendichte von 2,5 aus, dann ergibt sich ein Faktor von rund 0,7. D. h., dass sich bei einer GFD von 2,5 rund 55 % (30 % + 25 %) weniger Dachfläche für eine solare Nutzung eignen.

Wirkungsgrad, Performance Ratio und Nutzungsgrad

Nachdem die verfügbaren und energetisch nutzbaren Flächen ermittelt wurden, werden die Flächen mit den spezifischen solaren Strahlungswerten multipliziert. Dies stellt die potenziell einfallende Strahlung dar. Je nachdem welche Technologie (PV oder Solarthermie) den einzelnen Flächen zugeordnet werden, sind zur Bestimmung der Energieerträge der Wirkungsgrad und die Performance Ratio bzw. der Nutzungsgrad zu berücksichtigen.

Für Flächen die zur Stromerzeugung (PV) dienen, wird ein Wirkungsgrad von 15 % angesetzt. Weiterhin werden folgende monatspezifische PR-Werte angesetzt.

Tab. 22: Performance (%) von PV-Anlagen im Jahresverlauf

	Jan.	Feb.	Mrz.	Apr.	Mai	Jun.	Jul.	Aug.	Sep.	Okt.	Nov.	Dez.	Ø
1.Quartil	99	97	91	90	88	86	84	88	87	89	93	99	89
Mittelwert	100	98	91	90	89	87	85	88	88	90	94	100	90

Für Flächen, die zur Bereitstellung solarer Wärme (Solarthermie) verwendet werden, wird ein Nutzungsgrad von 35 % und Leitungsverluste von 10 % bei einer Einzelversorgung bzw. 15 % bei einer Nahwärmelösung angesetzt.

Dimensionierung der Solarkollektorfläche

Die ermittelten solarenergetisch nutzbaren Dachflächen können sowohl zur Erzeugung elektrischer als auch thermischer Energie eingesetzt werden. Somit besteht eine konkurrierende Nutzung der nutzbaren Dachflächen zwischen PV- und Solarthermieanlagen. Es gilt daher abzuwägen, welcher Energieform, welchem Flächenanteil zugesprochen wird.

Im Berechnungsverfahren ist es grundsätzlich möglich die Aufteilung der zur Verfügung stehenden Dachflächen frei für die Nutzung durch Photovoltaik und Solarthermie aufzuteilen. Hierzu können für Photovoltaik und Solarthermie Setzungen zwischen 0 % und 100 % festgelegt werden. Für die vorliegende Arbeit wird der Anteil der für die solare Stromerzeugung (PV) genutzten Dachflächen von 60 % und für die solare Wärmeerzeugung von 40 % ausgegangen. Hierbei handelt es sich um eine frei gewählte Aufteilung der gesamten zur Verfügung stehenden solar nutzbaren Dachfläche. Da in der Praxis i. d. R. nur Teilflächen der Dächer genutzt werden konnten keine Anhaltspunkte für eine realitätsnahe Aufteilung abgeleitet werden. In diesem Sinne sind die nachfolgenden Überlegungen und Berechnungen auch als theoretisch-technische Obergrenze der Flächennutzung zu verstehen.

5.2 Energetische Nutzung organischer Abfälle aus dem Siedlungsbereich

Die energetische Nutzung organischer Reststoffe aus dem Siedlungsbereich stellt aus Sicht des Klimaschutzes und der Substitution konventioneller Brennstoffe eine sinnvolle und erstrebenswerte Alternative dar. Bestandteile der organischen Siedlungsabfälle sind beispielsweise Rasen-, Strauch- und Baumschnitt sowie Laub und Küchenabfälle. Aus diesen können gasförmige, flüssige und feste Brennstoffe hergestellt werden, die gelagert und daher flexibel für die Erzeugung elektrischer und/oder thermischer Energie eingesetzt werden. Sie können daher zur Deckung von Spitzenlast oder Grundlast eingesetzt werden. Gegenüber anderen regenerativen Energien (solaren Energieerzeugung, Windkraft) stellt die Speicherung und flexible Nutzung einen wichtigen Vorteil dar. Problematische Aspekte, wie die Flächen- und Nutzungskonkurrenzen beim Anbau von Energiepflanzen (Tank-Teller-Diskussion), werden durch die Nutzung organischer Reststoffe umgangen bzw. verringert (WBGU 2008, S. 61 - 75).

Das theoretische Potenzial organischer Reststoffe aus dem Siedlungsbereich wird deutschlandweit auf etwa 14 Mio. t_{FM}/a geschätzt (Brosowski, A. *et al.* 2015, Kern, M. *et al.* 2015). Im Vergleich hierzu beträgt das Potenzial land- und forstwirtschaftlicher Erzeugnisse etwa 343,3 Mio. t_{FM}/a. Ein Großteil der land- und forstwirtschaftlichen Erzeugnisse ist jedoch bereits im Einsatz (Brosowski, A. *et al.* 2015). Trotz der vergleichsweise geringen Massen und Energie Relevanz der organischen Siedlungsabfälle sprechen mehrere Vorteile für eine Nutzung dieser. Hierzu zählt beispielsweise die geringe Nut-

zungskonkurrenz (z. B. Tank-Teller-Diskussion). Durch eine optimierte Kreisauflührung kann die Nutzungskonkurrenz, zwischen stofflicher (Kompostierung) und energetischer Nutzung, auf ein Minimum reduziert werden. So kann beispielsweise mittels der Vergärung aus organischen Siedlungsabfällen Biogas hergestellt werden. Die verbleibenden Gärreste können anschließend für die Kompostierung eingesetzt werden. Auch die bei einer thermischen Verwertung organischer Abfälle zurückbleibende Asche kann für die Düngung verwendet werden. Darüber hinaus belegen Untersuchungen (Kern, M. *et al.* 2010; S. 180, Richter, F. *et al.* 2017), dass eine gezielte energetische und stoffliche Nutzung organischer Siedlungsabfälle zu einer Reduzierung des Treibhausgasausstoßes, gegenüber der bisherigen thermischen Verwertung des Hausmülls, führen.

Zur Abschätzung des energetischen Potenzials organischer Siedlungsabfälle werden nachfolgend die beiden organischen Fraktionen Grünabfälle und Speiseabfälle beleuchtet, die in den Wohngebieten anfallen.

5.2.1 Aufkommen organischer Siedlungsabfälle privater Haushalte

Die organischen Siedlungsabfälle privater Haushalte lassen sich in Grün- und Speiseabfälle unterteilen. Grünabfälle entstehen vorrangig durch die Pflege und Nutzung privater Grünflächen. In kleinerem Umfang können aber auch in Gebieten mit geringen Grünflächen Grünabfälle durch Zimmerpflanzen entstehen. Grünabfälle fallen somit mehrheitlich in Wohngebieten mit großen Grünflächen an, wo hingegen das Aufkommen in dicht bebauten Wohngebieten geringer ausfällt. Anders verhält es sich hingegen beim Aufkommen von Speiseabfällen. Hier liegen die Pro-Kopf-Aufkommen i. d. R. über den locker bebauten Wohngebieten. Grund hierfür sind die verschiedenen Entsorgungswege.

So werden Speiseabfälle zusammen mit Grünabfällen und Fremdstoffen über die Biotonne und den Hausmüll entsorgt. Darüber hinaus werden Speiseabfälle, insbesondere in ländlichen Räumen (Göbel, C. *et al.* 2012), teilweise auch kompostiert, an Tiere verfüttert und über die Kanalisation entsorgt. Schätzungen von Rosenbauer, J. (2011) und Kranert, M. *et al.* (2012) gehen davon aus, dass jährlich rund 5,8-7,5 Mio. Tonnen an Speiseabfällen entsorgt werden. Darin enthalten sind jeweils mit bis zu 1,5 Mio. Tonnen pro Jahr Speiseabfälle, die über die Kanalisation entsorgt und die der Eigenkompostierung zugeführt werden (Kranert, M. *et al.* 2012). Je Einwohner/in sind dies zwischen 71 kg/a und 92 kg/a Speiseabfälle (Stand 2010).

Küchen- und Nahrungsmittelabfälle im Biogut

Das Abfallaufkommen organischer Siedlungsabfälle belief sich 2014 auf rund 4,6 Mio. t und lag damit 0,3 Mio. t höher als 2013 (Statistische Ämter des Bundes und der Länder 2013, 2014a). Im Durchschnitt sind dies je Einwohner/in 57 kg/a Biogut (Statistische Ämter des Bundes und der Länder 2014a). Laut Kern, M. *et al.* (2010), Kranert, M. *et al.* (2012), Wagner, J. *et al.* (2012), Krause, P. *et al.* (2015) und Sabrowski, R. (2015) setzt

sich das Biogut zu 7 - 50 Mass.-% aus Küchen- und Nahrungsmittelabfälle und zu 47 - 95 Mass.-% aus Gartenabfällen zusammen (Tab. 23). Neben Küchen- und Grünabfällen befinden sich zudem auch geringe Mengen an Fremdstoffen (sogenannte Fehlwürfe) im Biogut, vorrangig in Form von Verpackungsmaterialien. Laut Wimmer, W. *et al.* (2009), Kern, M. *et al.* (2010), Kern, M. *et al.* (2015) und Sabrowski, R. (2015) machen diese Fehlwürfe rund 1 - 10 Mass.-% der eingesammelten Abfälle aus.

Tab. 23: Zusammensetzung des Biogutes.

Biogut	Einheit	Unterer Wert	Oberer Wert	Mittlerer Wert
Küchenabfälle	Mass.-%	7	50	30
Grünabfälle	Mass.-%	47	95	65
Fremdstoffe	Mass.-%	1	10	5

Verantwortlich für die teils großen Bandbreiten sind z. B. unterschiedliche Aufkommen je nach Bebauungsstruktur. Analysen zeigen diesbezüglich für verschiedene Bebauungsstrukturen Unterschiede in der Zusammensetzung und Menge des getrennt gesammelten Biogutes (Kern, M. *et al.* 2015, Sabrowski, R. 2015). Demnach entfällt tendenziell in verdichteten Bebauungsstrukturen ein größerer Anteil des Biogutes auf die Fraktionen Küchenabfälle sowie organische Fein- und Mittelabfälle. In gering verdichteten Bebauungsstrukturen überwiegen i. d. R. die Grünabfälle. Der Anteil der Verunreinigungen durch Fehlwürfe liegt mit rund 5-8 % in Bebauungsstrukturen mit Geschosswohnungsbauten höher als in den Eigenheimsiedlungen (Gröll, K. *et al.* 2015, Kern, M. *et al.* 2015, Sabrowski, R. 2015). Unterschiede in der Zusammensetzung des Biogutes ergeben sich jedoch auch durch die unterschiedlich intensive Anwendung der Eigenkompostierung. Dies betrifft insbesondere Siedlungen mit einem hohen Anteil an Eigenheimen mit eigenem Garten. Krause, P. *et al.* (2015) weisen ebenfalls auf eine unterschiedliche Zusammensetzung des Bioguts in ländlichen und städtischen Entsorgungsgebiete hin. So beträgt der Anteil an Küchenabfällen 23 % in dünn besiedelten, ländlichen und verdichteten Kreisen sowie 45 % in Kernstädten.

Küchen- und Nahrungsmittelabfälle im Hausmüll

Jährlich werden große Mengen an Hausmüll durch die öffentlich-rechtlichen Entsorgungsträger gesammelt und entsorgt. Das Gesamtaufkommen des Hausmülls lag 2014 bei rund 13,2 Mio. t (Statistische Ämter des Bundes und der Länder 2014a). Je Einwohner/in sind dies im Durchschnitt 162 kg Hausmüll. Das Pro-Kopf-Aufkommen ist jedoch regional sehr unterschiedlich und reicht von etwa 50 kg bis 360 kg je Einwohner/in¹⁴

¹⁴ Nicht berücksichtigt wurden bei der Auswertung Kreise und kreisfreie Städte mit fehlenden Angaben, da davon auszugehen ist, dass in jedem Kreis und jeder kreisfreien Stadt Haus- und Sperrmüll anfällt und gesammelt wird.

(Kern, M. & Siepenkothen, J. 2014a, Raussen, T. *et al.* 2014, Statistische Ämter des Bundes und der Länder 2014a).

Auf der Grundlage einer Auswertung diverser Restabfallanalysen liegt der Anteil organischer Abfälle im Hausmüll zwischen 10 % und 60 %. Der durchschnittliche Anteil organischer Abfälle beträgt rund 36 %. Dies deckt sich gut mit den Untersuchungen von Kern, M. *et al.* (2010) und Kern, M. & Siepenkothen, J. (2014b), die von einem Anteil von rund 30 % bei Entsorgungsgebieten mit Biotonne und rund 40 % bei Entsorgungsgebieten ohne Biotonne sowie 39 % im Durchschnitt ausgehen. Dominiert werden die organischen Abfälle im Hausmüll durch die Speiseabfälle. Diese machen rund 70 % der organischen Abfälle im Hausmüll aus. Weitere rund 20 % entfallen auf Garten- und Grünabfälle. Dies deckt sich mit Untersuchungen von Adwiraah, H. *et al.* (2014) und Richter, F. *et al.* (2017), die den Anteil von Garten- und Grünabfälle auf 18 % bzw. 22 % beziffern. Die verbleibenden 10 % teilen sich u. a. in verpackte Lebensmittelabfälle, Hygienepapier, holzige Abfälle und sonstige nicht näher differenzierte organische Abfälle auf (Tab. 24).

Tab. 24: Zusammensetzung des Hausmülls (Eigene Berechnungen)

Hausmüll	Einheit	Unterer Wert	Oberer Wert	Mittlerer Wert
Speiseabfälle	Mass.-%	7	44	26
Grünabfälle	Mass.-%	0	18	7
Sonstige organische Abfälle	Mass.-%	0	10	4
Sonstiger Hausmüll	Mass.-%	43	91	63

Die Bandbreite unterschiedlicher Anteile organischer Abfälle im Hausmüll werden u. a. durch den Anschlussgrad an eine getrennte Sammlung von Bioabfällen, die Verbreitung der Eigenkompostierung, die Höhe der Gebühren und das Gebührensystem erklärt (Fripan, J. 2002, Marb, C. *et al.* 2003, Knappe, F. *et al.* 2007, Kern, M. *et al.* 2015). Anders als beim Biogut zeigen eigene Auswertungen von Restmüllanalysen zum Aufkommen von Lebensmittel- und Speiseabfällen nur geringe Unterschiede für unterschiedliche Bebauungsstrukturen. So liegt der arithmetische Mittelwert von Lebensmittel- und Speiseabfällen in gering verdichteten Bebauungsstrukturen bei 26 % und in verdichteten Bebauungsstrukturen bei 30 %. Es zeigt sich jedoch weiterhin, dass das Aufkommen an Hausmüll in verdichteten Mehrfamilienhausgebieten in den ausgewerteten Hausmüllanalysen häufig höher lag als das Aufkommen in gering verdichteten Ein- und Mehrfamilienhausgebieten. Im Durchschnitt liegt das Hausmüllaufkommen in verdichteten Mehrfamilienhausgebieten rund 10-20 % über und das Hausmüllaufkommen in gering verdichteten Ein- und Mehrfamilienhausgebieten zwischen 10-15 % unter dem durchschnittlichen Hausmüllaufkommen des Untersuchungsgebiets. Weitere Auswertungen ergaben jedoch nur einen schwachen Zusammenhang.

Weitere Entsorgungswege und Umfang von Speiseabfällen

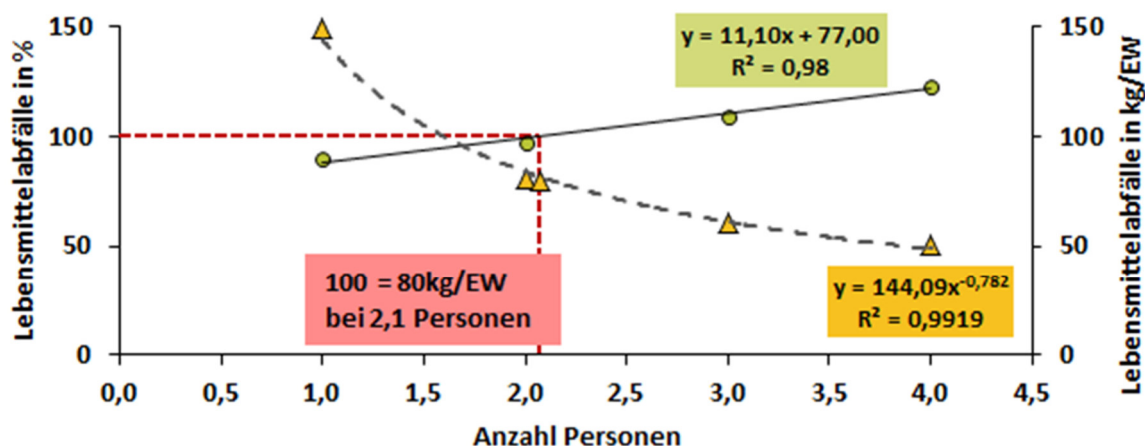
Neben der Entsorgung in der Biotonne (Biogut) und über den Hausmüll werden Lebensmittel- und Speiseabfälle eigenkompostiert, an Tiere verfüttert, illegal entsorgt und über die Kanalisation entsorgt (Kranert, M. *et al.* 2012, Krause, P. *et al.* 2015). Kranert, M. *et al.* (2012) und Krause, P. *et al.* (2015) gehen von einer spezifischen Einwohner/innen bezogenen Abfallmenge von bis zu 19 kg/a bzw. 13 kg/a aus, die über die Kanalisation entsorgt wird. In Adwiraah, H. *et al.* (2014) wird hingegen ein Aufkommen von 3 kg je Einwohner/in und Jahr angenommen. Bezogen auf die im Hausmüll entsorgten Lebensmittel- und Speiseabfälle machen die über die Kanalisation entsorgten Abfälle zwischen 5 %-31 % aus.

Für die Eigenkompostierung kommt Kranert, M. *et al.* (2012) auf Werte von bis zu 18 kg/EW*a und Richter, F. *et al.* (2017) auf 12,3 kg/EW*a. Adwiraah, H. (2015) wiederum führt für Einwohner/in mit Biotonne einen Wert von 6 kg und 15-20 kg je Einwohner/in und Jahr für Einwohner/in ohne Biotonne an. Laut Richter, F. *et al.* (2017) nutzen 39 % der Haushalte in Ein- und Zweifamilienhausgebieten eine Eigenkompostierung. Im Fall der Mehrfamilienhausbebauung sind es lediglich 9 %. An Tiere verfüttert werden laut Kranert, M. *et al.* (2012), Adwiraah, H. *et al.* (2014) und Richter, F. *et al.* (2017) zwischen 3-6 kg je Einwohner/in und Jahr. Krause, P. *et al.* (2015) fassen Eigenkompostierung, Verfütterung und Entsorgung über die Kanalisation zusammen und gehen von 10 kg je Einwohner/in und Jahr aus. Insgesamt wird die über die sonstigen Entsorgungswege erschließbare Abfallmenge als gering eingeschätzt (Kranert, M. *et al.* 2012, Richter, F. *et al.* 2017).

Sozioökonomische Einflussfaktoren

Neben Aspekten wie Anschlussgrad, Eigenkompostierung, Höhe der Gebühren und Bauungsstruktur zeigen Untersuchungen von Quedsted, T. & Johnson, H. (2009) und Jörissen, J. *et al.* (2015) den Einfluss sozio-demografischer Merkmale, wie Haushaltsgröße und Alter, auf die Entsorgung von Lebensmitteln. Untersuchungen von Rosenbauer, J. (2011) für Deutschland zeigen denselben Sachverhalt. So steigt das Aufkommen von Lebensmittelabfällen mit der Haushaltsgröße unterproportional an. Im Umkehrschluss sinkt folglich das spezifische Aufkommen von Lebensmittelabfällen je Person mit steigender Haushaltsgröße (Abb. 44).

Laut Richter, F. *et al.* (2017) beeinflusst die Haushaltsgröße und das Alter der Bewohner/innen darüber hinaus auch den Anteil der Eigenkompostierer/innen. So steigt mit zunehmendem Alter und Haushaltsgröße der Anteil der Eigenkompostierung.



Grafik: Norbert Krauß
Daten: Rosenbauer (2011)

Abb. 44: Spezifisches Aufkommen von Lebensmittelabfällen in Abhängigkeit der Haushaltsgröße

Grün- und Gartenabfälle privater Haushalte

Zur Berechnung der technischen Grün- und Gartenabfälle privater Haushalte wird ein Bottom-up-Ansatz verwendet. Als Input gehen Flächenangaben zu den Grünflächen der privaten Haushalte und flächenspezifische Ertragskennwerte ein. Die privaten Grünflächen werden mittels des in Kapitel 3 aufgezeigten Berechnungsansatzes ermittelt und in die beiden Kategorien „Rasen- und Beetflächen“ sowie „Flächen mit Hecken und Gehölz“ unterteilt. Flächenspezifische Ertragskennwerte für Grünabfälle wurden im Rahmen einer Literaturrecherche zusammengetragen.

Eine Gegenüberstellung der Kennwerte zeigt ein breites Spektrum an Flächenerträgen mit unterschiedlichen Flächenbezügen und Rahmenbedingungen (Tab. 25). Die Kennwerte von Nonn, H. *et al.* (2006) z. B. entstammen Aufwuchsversuchen, die unter vergleichsweise guten Rahmenbedingungen (Standort, Düngung, geringe Verschattung) durchgeführt wurden. Andere Kennwerte, wie z. B. in Ketelsen & Doedens (1992)¹⁵ beziehen auch Weidegras mit ein, das in privaten Gärten i. d. R. nicht vertreten ist. Zudem liegen nur in Ausnahmefällen Informationen zur Strukturierung der Bezugsflächen bei Grünabfällen vor. Aufgrund dessen sind die aufgeführten flächenspezifischen Kennwerte nur bedingt miteinander vergleichbar und auf die in der Arbeit verwendeten Flächen übertragbar. Wagner, J. *et al.* (2012) und Adwiraah, H. (2015) gehen bei der Mehrheit der in der Literatur genannten flächenspezifischen Erträge von einer Überschätzung aus. Adwiraah, H. (2015) kommt in seinen Untersuchungen diesbezüglich zu dem Schluss, dass der realisierte Rasenschnitt rund 40 % niedriger ausfällt als die in der Literatur genannten Kennwerte. Aufgrund fehlender Informationen zur Aufteilung der Grünflächen ist es nicht möglich, die Grünabfälle in die beiden Fraktionen krautig und holzig aufzuteilen.

¹⁵ Zitiert in Henssen 2009

Dies ist jedoch notwendig, da die unterschiedlichen Abfallfraktionen spezifische energetische Eigenschaften aufweisen und auch unterschiedliche Verwertungspfade bedingen.

Tab. 25: Spezifische Flächenerträge von Grünabfällen je m²

Art des organischen Abfalls	Fläche	Mittelwert	kg FM/m ² *a		Quelle
			Min	Max	
Krautige Gartenabfälle und Rasenschnitt	bepflanzte Fläche	2,25	k.A.	k.A.	(Körner, I. <i>et al.</i> 2011)
Rasen im Park, ungedüngt oder selten gedüngt	bepflanzte Fläche	3,0*			(Dunkelberg, E. <i>et al.</i> 2011)
Rasenschnitt (inkl. Weidegräsern)	bepflanzte Fläche	1,85	1,5	≤ 2,2 (3,5)	(Ketelsen & Doedens 1992) ¹
Rasenschnitt	bepflanzte Fläche	2,25	1,5	3,0	(Fricke <i>et al.</i> 1994) ¹
Rasenschnitt	bepflanzte Fläche	1,00	0,6	1,4	(Adwiraah, H. 2015)
Rasenschnitt	bepflanzte Fläche	1,0			(Adwiraah, H. <i>et al.</i> 2014)
Rasenschnitt (Gebrauchsrasen div. Sorten)	bepflanzte Fläche	2,10	1,7	2,5	(Nonn, H. <i>et al.</i> 2006)
Rasenschnitt	bepflanzte Fläche	2,20			Doedens (1982) ³
Gehölzschnitt	bepflanzte Fläche	0,4	0,15	0,70	(Fricke <i>et al.</i> 1994) ¹
Gehölzschnitt	bepflanzte Fläche	0,4			Doedens (1982) ³
Gehölzschnitt	bepflanzte Fläche	0,4	0,14	0,6	(Adwiraah, H. 2015)
Gehölzschnitt inkl. Strauchschnitt	bepflanzte Fläche	1,1	0,5	1,7	(Adwiraah, H. 2015)
Holzige Gartenabfälle	bepflanzte Fläche	0,43			(Adwiraah, H. <i>et al.</i> 2014)
Mischgrün ohne Rasen und holzige Biomasse	bepflanzte Fläche	1,5			(Adwiraah, H. <i>et al.</i> 2014)
Grünschnittaufkommen	Fläche priv. Hausgärten	1,8			(Wagner, J. <i>et al.</i> 2012)
Grünschnittaufkommen	Siedlungsgrünflächen	1,5			Scheffold (2007) ³
Grünschnittaufkommen	Grünflächen der Wohnbebauung		1,4		Scheffold (2007) ³
Grünschnittaufkommen	k.A.	2,25	0,50	4,00	(Fricke <i>et al.</i> 1994) ²
Gartenabfallaufkommen	Fläche priv. Hausgärten	1,9			(Krause, P. <i>et al.</i> 2015)

Zitiert in: ¹ (Wagner, J. *et al.* 2012); ² (Henssen, D. 2009); ³ (Adwiraah, H. 2015); *bei 20 % TM

Daher wurden aufbauend auf den Ausführungen von Adwiraah, H. (2015), ausgewählten Literaturwerten sowie eigenen Berechnungen flächenspezifische Ertragskennwerte für die beiden Flächenkategorien „Rasen- und Beetflächen“ sowie „Flächen mit Hecken und Gehölz“ abgeleitet. Adwiraah, H. (2015) und Fricke (1994)¹⁶ beziffern den spezifischen Ertrag holziger Grünabfälle auf 0,14-0,7 kg FM je m² bepflanzter Fläche und Jahr. Werden noch Sträucher hinzugezogen erhöht sich der Ertrag auf 0,5-1,7 kg FM je m² bepflanzter Fläche und Jahr. Für die Kategorie krautiger Grünabfälle weist Körner, I. et al. (2011) einen spezifischen Ertrag in Höhe von 2,25 kg FM je m² bepflanzter Fläche und Jahr. Unklar ist hierbei, welche Abfallfraktionen genau enthalten sind und was die bepflanzte Fläche einbezieht. Eigene Berechnungen aufbauend auf den Werten von Adwiraah, H. (2015) kommen zu einem spezifischen Ertrag von 2,3-3,3 kg FM je m² Rasen- und Beetflächen und Jahr. Für die Berechnungen werden dahingehend ein spezifischer Ertrag für Flächen mit Hecken und Gehölz von 1,1 kg FM/m²*a und für Rasen- und Beetflächen ein Ertrag von 2,8 kg FM/m²*a angenommen.

5.2.2 Berechnung des Aufkommens organischer Siedlungsabfälle im Modell

Ausgehend von den zuvor angeführten Recherchen und Berechnungen werden für die Berechnung des Biomassepotenzials die in Tab. 26 zusammengefassten Annahmen verwendet.

Tab. 26: Anteiliges Aufkommen von Küchen- und Nahrungsmittelabfällen im Bio- und Hausmüll

Art	Küchen- und Nahrungsmittelabfälle im	
	Biogut	Hausmüll
EFH mit Biotonne	30 %	20 %
EFH ohne Biotonne	-	30 %
MFH mit Biotonne	40 %	25 %
MFH ohne Biotonne	-	35 %

Zur Bestimmung der Lebensmittelabfälle werden darüber hinaus Informationen zum Anschlussgrad der Bewohner/innen an eine separate Biogutentsorgung benötigt. Es wird dahingehend in Haushalte „mit Biotonne“ [%_{mBio}] und „ohne Biotonne“ [%_{oBio}] unterschieden.

Liegen keine Informationen zum Anschlussgrad für das betreffende Untersuchungsgebiet vor, können nachfolgende Annahmen von Krause, P. et al. (2015) angesetzt werden:

¹⁶ Zitiert in Wagner et al. 2012

Tab. 27: Anschlussgrad nach Siedlungsstruktur

Siedlungsstruktur	Mittlerer Anschlussgrad in %
Städte mit >100.000 Einwohner	67
Kreise mit >150 Einwohner/km ²	69
Kreise mit 100 - 150 Einwohner/km ²	59
Kreise mit <100 Einwohner/km ²	51

Mit Hilfe des Anschlussgrads werden die Kennwerte in Tab. 26 gewichtet. Hierzu werden nachfolgende Formeln verwendet.

$$Biogut_{Leb} = \%_{mBio} * \%_{Leb; Bio} * Biogut \quad \text{in [kg]} \quad \text{Formel [37]}$$

$$Hausmüll_{Leb} = \%_{oBio} * \%_{Leb; HM} * Hausmüll \quad \text{in [kg]} \quad \text{Formel [38]}$$

Für die Berechnungen im Modell wird ein zusätzliches Potenzial der über die sonstigen Entsorgungswege entsorgten Lebensmittelabfälle $[f_{Leb; sE}]$ von 15 % für Ein- und Zweifamilienhausgebiete sowie 7,5 % für Mehrfamilienhausgebiete angenommen (bezogen auf die entsorgten Lebensmittel- und Speiseabfälle im Hausmüll). Der höhere Wert in Ein- und Zweifamilienhausgebieten wird mit einer stärkeren Eigenkompostierung und Verfütterung gegenüber den Gebieten mit Mehrfamilienhäusern begründet (Richter, F. *et al.* 2017).

$$Abfall_{Leb} = Biogut_{Leb} + Hausmüll_{Leb} * (1 + \%_{Leb; sE}) \quad \text{in [kg]} \quad \text{Formel [39]}$$

Im Weiteren wird der Einfluss des haushaltsgrößenabhängigen Aufkommens von Lebensmittelabfällen $[f_{Leb; HH}]$ berücksichtigt. Hierzu wird auf die zuvor dargelegte Untersuchung von Rosenbauer, J. (2011) zurückgegriffen. Mit der in Abb. 44 aufgeführten Formel [40] wird in Abhängigkeit der Haushaltsgröße das Aufkommen von Lebensmittelabfällen $[Abfall_{Leb}]$ angepasst.

$$f_{Leb; HH} = 180,11 * HH^{-0,782} \quad \text{in [\%]} \quad \text{Formel [40]}$$

Zur Berechnung der Grünabfälle $[Abfall_{Grüngut}]$ werden die spezifischen Flächenerträge aus Tab. 28 mit den für die Strukturtypen ermittelten Grünflächen multipliziert.

Tab. 28: Spezifischer Flächenertrag von Grünabfällen

Art der Grünabfälle	Einheit	Rasen & Beete	Bäume & Hecken
Krautig	kg/m ² *a	2,8	-
Holzlig	kg/m ² *a	-	1,1

5.2.3 Energiebereitstellung aus organischen Siedlungsabfällen privater Haushalte

Die zuvor dargelegten organischen Abfallfraktionen, Nahrungs- und Küchenabfälle sowie Grünabfälle, können in feste, flüssige und gasförmige Energieträger umgewandelt und zur energetischen Nutzung eingesetzt werden. Hierzu durchlaufen die organischen Abfallfraktionen verschiedene Aufbereitungs- und Veredelungsprozesse. Weit verbreitet sind z. B. die Gewinnung von Biogas mittels Vergärung oder die Bereitstellung von festen organischen Brennstoffen durch Trocknungs- bzw. Entwässerungsprozesse. Zur Aufbereitung und Veredelung werden thermische und elektrische Energie benötigt. Diese reduzieren die verfügbare Energie, was bei der Berechnung des energetischen Potenzials berücksichtigt werden muss.

Hierzu werden nachfolgend kurz die mit ausgewählten Aufbereitungs- und Veredelungsprozessen verbundenen Energiebedarfe beschrieben, bevor anschließend der Berechnungsansatz zur Potenzialabschätzung dargelegt wird.

Gewinnung gasartiger Brennstoffe aus organischen Siedlungsabfällen

Zur Erzeugung gasartiger Brennstoffe durchlaufen die organischen Siedlungsabfälle mehrere Verfahrensschritte. Hierzu gehören die Anlieferung der Biomasse, deren Aufbereitung und Eintrag in den Fermenter (Beschickung) sowie der Gärprozess im Fermenter. Nach der Vergärung wird der Gärrest ausgetragen und kann z. B. für die Herstellung von Kompost genutzt werden (Kaltschmitt, M. *et al.* 2016). Das gewonnene Rohbiogases wird von Wasser bzw. Wasserdampf und Schwefel befreit und anschließend zwischengespeichert. Das Biogas kann nun in einem Blockheizkraftwerk (BHKW) zur Erzeugung von elektrischer und thermischer Energie eingesetzt werden¹⁷.

Zur Durchführung dieser Prozesse benötigen die Anlagen Energie. Pumpen, Rührwerk und Lüftungsanlage z. B. benötigen elektrische Energie. Zur Aufrechterhaltung der für den Fermentationsprozess erforderlichen Wärme wird thermische Energie benötigt. Daher werden Biogasanlagen i. d. R. gemeinsam mit BHKWs betrieben. Laut einer Betreiberbefragung (Daniel-Gromke, J. *et al.* 2014b) benötigen Biogasanlagen im Durchschnitt

¹⁷ Eine detaillierte Beschreibung der Verfahren und Prozesse zur Aufbereitung und Umwandlung in organische Energieträger kann u. a. in Kaltschmitt *et al.* (2016) nachgelesen werden.

26,5 % der produzierten Wärmemenge und 7,5 % des produzierten Stroms. Untersuchungen von Burga, G. *et al.* (2010) kamen mit 8 % auf einen vergleichbaren Wert. Weiterhin zeigt sich, dass mit steigender elektrischer Anlagenleistung (kW_{el}) der mittlere Wärmebedarf sinkt (Tab. 29). Anders als beim Wärmebedarf zeigt sich kein klarer Zusammenhang zwischen der elektrischen Anlagenleistung und dem mittleren elektrischen Eigenbedarf (Tab. 29).

Tab. 29: Thermischer und elektrischer Energiebedarf beim Betrieb einer Biogasanlage

Installierte elektr. Anlagenleistung	Mittlerer Eigenwärmebedarf x	Mittlerer Eigenstrombedarf x
[kW_{el}]	[%]	[%]
≤ 70	60,5	10,0
71 – 150	38,4	6,9
151 – 500	26,1	7,2
501 – 1000	20,5	7,9
> 1000	13,9	8,7
Gesamt	26,5	7,5

Soll das Biogas darüber hinaus z. B. in das Erdgasnetz eingespeist werden, so muss das Biogas weitere Aufbereitungsprozesse durchlaufen, bis es die notwendige Qualität erreicht hat (FNR 2013, Adler, P. *et al.* 2014, Kaltschmitt, M. *et al.* 2016). Der Vorteil einer Aufbereitung zu Biomethan ist der verbesserte Energiegehalt des Produktgases, vergleichbar dem von Erdgas. Hieraus resultiert ein verringerter Speicherbedarf des Gases bei gleichem Energiegehalt. Erfüllt das erzeugte Biomethan die gesetzlichen Anforderungen, dann kann es im Anschluss in das Erdgasnetz eingespeist werden und steht damit für weitere Anwendungsbereiche zur Verfügung. So z. B. für den Einsatz in Kleinfeuerungsanlagen, ohne, dass Umrüstungen bei den Feuerungsanlagen wie beim Biogas vorgenommen werden müssen. Eine weitere Alternative ist die Nutzung als Kraftstoff im Mobilitätsbereich.

Bei der Aufbereitung zu Biomethan durchläuft das Rohbiogas zunächst die gleichen Reinigungsprozesse wie zuvor dargelegt. Bei der Reinigung des Rohbiogases ist jedoch zu beachten, dass nicht alle Verfahren die notwendige Reinigungsqualität, wie sie in den Arbeitsblättern DVGW G 260 und DVGW G 262 gefordert werden, erreichen. Daher ist bereits zu Beginn zu entscheiden, welcher Nutzungspfad verfolgt werden soll, damit die entsprechenden Reinigungs- und Aufbereitungsverfahren ausgewählt werden können. Zusätzlich zur Reinigung wird dem Rohbiogas Kohlenstoffdioxid (CO_2) entzogen und hierdurch der Gehalt von Methan erhöht.

Tab. 30: Ausgewählte Verfahren zur Aufbereitung von Biogas zu Biomethan.

	Druckwasserwäsche (DWW)	Druckwechseladsorption (DWA)	Aminwäschen (MEA, DEA)
Erreichbarer Methangehalt	> 98 %	> 97 %	> 99 %
Elektr. Energieaufwand	0,20 - 0,40 kWh/m ³ Rohgas	0,20 - 0,40 kWh/m ³ Rohgas	0,06 - 0,28 kWh/m ³ Rohgas
Therm. Energieaufwand	Kein Wärmebedarf	Kein Wärmebedarf	0,4 - 0,8 kWh/m ³ Rohgas

Quelle: Zusammenstellung auf Basis von Wendt, H. (2008), Graf, F. *et al.* (2009), Beil, M. *et al.* (2012), Daniel-Gromke, J. *et al.* (2013), Adler, P. *et al.* (2014), Daniel-Gromke, J. *et al.* (2014b), Görisch, U. & Helm, M. (2014) und Scheftelowitz, M. *et al.* (2015).

Die gängigsten Verfahren zur Abtrennung des Kohlenstoffdioxids in Deutschland sind die Druckwasserwäsche, die Druckwechseladsorption und die chemische Aminwäsche (Daniel-Gromke, J. *et al.* 2014a). Verfahren wie das Membrantrennverfahren, die Polyglykolwäsche und das Membran- / Kryogentrennverfahren waren zum Zeitpunkt der vorliegenden Arbeit noch im Entwicklungsstadium und/oder nur wenig verbreitet (Scheftelowitz, M. *et al.* 2015) und werden daher nicht berücksichtigt.

Gewinnung fester Brennstoffe aus organischen Siedlungsabfällen

Ziel der Aufbereitung von Grünabfällen aus dem Siedlungsbereich ist die Bereitstellung von organischen Brennstoffen, die bestimmte physische und chemische Eigenschaften einhalten. Für die Bereitstellung fester Brennstoffe durchlaufen die holzigen Grünabfälle je nach Material und Zielprodukt, verschiedene Aufbereitungsschritte. Hierzu gehört die Zerkleinerung, die Trocknung und das Absieben des holzigen Abfalls. Die Trocknung kann je nach Material und lokalen Rahmenbedingungen vor der Zerkleinerung, während des Siebprozesses oder auch im Anschluss daran erfolgen. Abschließend wird das geschredderte und gesiebte Zwischenprodukt zu Hackschnitzel, Schredderholz oder Pellets, aufbereitet. Dies betrifft jedoch nur das energiereichere holzige Mittelkorn. Das Feinkorn sowie ein kleinerer Anteil des Mittelkorns (Strukturmaterial) werden für die Kompostierung verwendet (Witzenhausen-Institut 2010, Raussen, T. & Wagner, J. 2015).

Der Energiebedarf zur Zerkleinerung holziger Biomasse ist abhängig von der Holzart, eingestellter Schnittlänge und Wassergehalt des Holzes. Laut Brusche, R. (1983) liegt der spezifische Energieverbrauch für waldfisches Holz beispielsweise zwischen 2 bis 5 kWh/t. Kuptz, D. *et al.* (2015) kommen in Feldversuchen auf Energieverbräuche von 14,8-49,0 kWh/t_{atro} bzw. 6,7-22,1 kWh/t_{FM} bei einem Wassergehalt von 55 %.

Die Trocknung von Biomasse dient der Reduzierung des Wassergehalts und damit zur Vorbeugung von biologischen Ab- und Umbauprozessen des biogenen Materials. Durch die Trocknung verbessern sich zudem die Lagerfähigkeit und der Heizwert des biogenen Materials. Die Trocknung kann auf natürlichem Wege oder mittels technischer Prozesse erzielt werden (Kaltschmitt, M. *et al.* 2016).

Die natürliche Trocknung erfolgt durch Bodentrocknung, natürliche Konvektionstrocknung oder durch Selbsterwärmung bzw. einer Kombination dieser Varianten. Bei der natürlichen Trocknung können prinzipiell unter optimalen Bedingungen (trockener Standort mit hoher Luftzirkulation) Wassergehalte von 15 – 20 % erreicht werden (Schulz, W. *et al.* 2007, Kaltschmitt, M. *et al.* 2016). Hierfür werden jedoch meist größere Flächen benötigt.

Bei einer technischen Trocknung durch Lüftungsanlagen werden diese Parameter gezielt gesteuert (Kaltschmitt, M. *et al.* 2016). Von besonderem Interesse erscheint in diesem Kontext die Nutzung von Abwärme und Verbrennungsabgasen aus bestehenden Feuerungsanlagen (z. B. BHKW, Biomasseheiz(kraft)werken) zur Vorwärmung der Trocknungsluft. Je nach Verfahren beträgt die Temperatur der Trocknungsluft zwischen Außentemperatur (Belüftungskühlung) und 600°C (Heißlufttrocknung).

Der thermische Energiebedarf zur Trocknung verschiedener Biomassen (Holz-, Grünhackgut, Getreide, usw.) liegt für Band- und Schubwendetrockner zwischen 0,75 und 1,9 kWh_{th}/kg H₂O (Neuß, J. & Pietzsch, B. 2002, Schulz, W. *et al.* 2007; S. 53f). Der elektrische Energiebedarf für den Betrieb der Lüftungsanlage und der Trocknungsanlage liegt bei etwa 0,02 – 0,04 kWh_{el}/kg H₂O (Neuß, J. & Pietzsch, B. 2002, Schulz, W. *et al.* 2007; S. 53f). Übertragen auf eine Tonne holzigen Grünschnitts mit 40 % Wassergehalt, entspricht dies einem Energiebedarf von 300-760 kWh_{th} und 8-16 kWh_{el} je Tonne Brennstoff. Laut einer Literaturrecherche von Vogt, R. & Fehrenbach, H. (2010) liegt der Energieverbrauch für die Trocknung von Holzhackschnitzeln bei 0,9 kWh_{th}/kg Brennstoff (ca. 424 kWh_{th}/t Brennstoff), bei einem Wassergehalt von 40 % des Holzinputs und 8 % Wassergehalt des Brennstoffs (Hackschnitzel).

5.2.4 Berechnung des energetischen Potenzials im Modell

Die Berechnung des energetischen Potenzials organischer Siedlungsabfälle beinhaltet die Berechnung des Masseaufkommens organischer Siedlungsabfälle und berücksichtigt die anfallenden Energieaufwendungen für die Aufbereitungs- und Veredelungsprozesse in Abhängigkeit des Konversionspfades. Energieverbräuche in Form von Kraftstoffverbräuchen für Sammlung und Transport der organischen Siedlungsabfälle werden bei der Berechnung hingegen nicht berücksichtigt.

Ausgehend von dem Berechnungsansatz für das Aufkommen organischer Siedlungsabfälle im Abschnitt 5.2.2, stehen verschiedene energetische Nutzungspfade zur Auswahl. Grundsätzlich ist es möglich, für jeden Strukturtyp separate Nutzungspfade zu berech-

nen. In der vorliegenden Arbeit wird jedoch zur Vereinfachung der Berechnungen die energetische Nutzung der Biomasse exemplarisch durch den Betrieb von zwei BHKWs mit angeschlossenem Wärmenetz für das gesamte Untersuchungsmodell modelliert. Zum Einsatz kommen ein biogasbetriebenes BHKW und ein Hackschnitzel-BHKW.

Tab. 31: Energiekennwerte organischer Substrate und Brennstoffe

Biomassefraktion	Wassergehalt	Energiekennwert	
	[in %]	[H_u] [kWh/kg]	
Küchen- und Nahrungsmittelabfälle ¹⁾	80	0,78	
Grünschnitt (krautig) ²⁾	55	0,98	
Holziger Grünschnitt	55	2,00	
Holz hackschnitzel	20	4,40	
Pellets	15	4,80	

¹⁾ Biogasertrag 130 m³/t_{FM}; Methan-Gehalt 60 %
²⁾ Biogasertrag 165 m³/t_{FM}; Methan-Gehalt 60 %

Für die Modellierung der energetischen Biomassenutzung müssen diesbezüglich energetische Verluste bei der Aufbereitung der Biomasse, der Umwandlung in Wärme und Strom sowie beim Transfer der Wärme durch Wärmenetze berücksichtigt werden. In der vorliegenden Arbeit wird für die Erzeugung des Biogases (Reinigung, Vergärung) ein Wärmebedarf und Strombedarf in Abhängigkeit der Anlagenleistung, gemäß Tab. 29, veranschlagt. Der hieraus resultierende Energiebedarf für Wärme und Strom wird vom Energiegehalt abgezogen, so dass der Nettoenergieertrag resultiert. Für die Aufbereitung (vorrangig Trocknung) holziger Biomasse wird ein Energiebedarf von 0,9 kWh_{th} und 0,05 kWh_{el} je Tonne holzigem Brennstoff veranschlagt.

Tab. 32: Kennwerte von Energieerzeugungsanlagen

Anlagen	Leistungs- bereich [kW]	Jahresnutzungsgrad		
		Gesamt [%]	Thermisch [%]	Elektrisch [%]
Block-Heizkraftwerk	<70	88	55	33
	71-150	85	48	37
	151-500	84	45	39
	501-1000	84	43	41
	>1000	84	42	42
Nahwärmeübergabestation			97	

Quelle: ASUE (2011); Scheftelowitz, M. et al. (2015); C.A.R.M.E.N. e.V. (2017); Krapf, G. (2000)

Bei der Umwandlung in thermische und elektrische Energie entstehen Verluste in Abhängigkeit der verwendeten Konversionsanlage. Für die hier veranschlagte Nutzung eines BHKWs wurde ein Jahresnutzungsgrad von 85 % veranschlagt. Hiervon entfallen 45 % auf die Wärmegewinnung und 40 % auf die Bereitstellung von Strom (vgl. Tab. 32).

Die durch Leitungsverluste [Q_{Netz}] auftretenden Wärmeverluste von Wärmenetzen liegen laut der Literatur zwischen 5 % und 30 % (Dötsch, C. *et al.* 1998, Blesl, M. 2002, Dunkelberg, E. *et al.* 2011, Wolff, D. & Jagnow, K. 2011, Thalmann, S. *et al.* 2013, AGFW 2015, 2016, 2017). Beeinflusst werden die Leitungsverluste u. a. durch die Trassenlänge und deren Dämmung, die Temperatur des Heizmediums und die Anschlussdichte bzw. Wärmedichte im Versorgungsgebiet (Dötsch, C. *et al.* 1998, Wolff, D. & Jagnow, K. 2011). Für die vorliegende Berechnung wird, in Anlehnung an die Literatur, vereinfachend von einem Wärmeverlust [Q_{Netz}] von 15 % ausgegangen.

5.3 Energiespeicher

Durch die zunehmende Integration regenerativer Energien in die Energieversorgung können erhebliche Anteile fossiler Brennstoffe substituiert werden. Bedingt durch Flächenkonkurrenz und Flächenangebot, lokalspezifischer Quelleigenschaften und der durch Witterungsbedingungen resultierenden fluktuierenden Verfügbarkeit kommt neben den Energieeinspar- und Effizienzmaßnahmen, künftig Energiespeichern eine zentrale Bedeutung zu.

Durch die Fähigkeit, überschüssige regenerativ erzeugte Energie zu speichern und zu einem späteren Zeitpunkt zur Deckung der Energienachfrage zu nutzen, kann der Beitrag regenerativer Energien zur Substitution fossiler Brennstoffe gesteigert werden. Gleichzeitig kann durch die Installation von Energiespeichern die für denselben Anteil bereitgestellter regenerativer Energie benötigte Erzeugungsleistung reduziert werden. Dies wiederum führt u. a. zu einer verringerten Flächenkonkurrenz und zu einer Entlastung der Stromnetze.

Je nach Technologie und regenerativer Energiequelle werden unterschiedliche Energiespeicher zur Speicherung von Strom, Wärme oder regenerativ erzeugter Brennstoffe in fester, flüssiger oder gasförmiger Form eingesetzt. So dienen Pufferspeicher zur Speicherung solar erzeugter Wärme und Blei-Batteriespeicher zur Zwischenspeicherung des durch Windkraft- oder Photovoltaikanlagen erzeugten Stroms. Feste, flüssige oder gasförmige Brennstoffe, z. B. aus organischen Abfällen oder in Form regenerativ erzeugten Wasserstoffs, können in Silos oder Gasspeichern zwischengespeichert werden.

Aufgrund ihrer bereits derzeitigen sowie zukünftigen Bedeutung werden in der vorliegenden Arbeit Energiespeicher in die Untersuchungen mit einbezogen. Hierzu werden nachfolgend die Speichersysteme und Kenngrößen die zur Berechnung benötigt werden vorgestellt und mit Kennwerten untersetzt. Bedingt durch die Betrachtungsebene und auf-

grund des Charakters der vorliegenden Arbeit erfolgt die Einbindung von Energiespeichern durch einen vereinfachten mathematischen Ansatz. Für die Einbindung der, in der vorliegenden Arbeit berücksichtigten regenerativen Energiequellen, werden nachfolgend Speicher zur Zwischenspeicherung von Strom und Wärme betrachtet.

5.3.1 Stromspeicher

Energiespeicher, die zur Speicherung von Strom dienen, liegen in unterschiedlichen Bauformen und Funktionsweisen vor. Die bekanntesten Stromspeicher sind die Akkumulatoren bzw. Batteriespeicher (Sekundärbatterien), die zur Gruppe der elektrochemischen Energiespeicher gehören. Neben den Batteriespeichersystemen existieren auch mechanische, chemische und elektrische Energiespeicher zur Speicherung von Strom. Bekannt sind z. B. das Schwungrad (mechanischer Speicher), Kondensatoren bzw. Supercaps (elektrische Energiespeicher) und das Verfahren Power-to-Gas, bei dem regenerativ erzeugter Strom genutzt wird, um z. B. aus Wasser Wasserstoff zu generieren (Elektrolyse). Bei der Wahl der Speichersysteme kommt es auf die Anwendung und die Betriebsführung an, denn nicht jedes Speichersystem eignet sich gleichermaßen für jede Anwendung. Dies schließt beispielsweise Fragen zur Energiedichte (Platzbedarf), Wirkungsgrad, Speicherdauer, Leistungs- oder Energiespeicher, usw. mit ein. Aufgrund dessen werden für die Betrachtung der Zwischenspeicherung von Strom in der vorliegenden Arbeit ausschließlich Batteriespeicher eingebunden. So weisen Batteriespeicher und insbesondere Lithium-Ionen-Batteriespeicher vergleichsweise hohe Energiedichten und damit einen geringeren Platzbedarf auf und lassen sich hierdurch vergleichsweise einfach in einem Wohngebäude installieren. Darüber hinaus sind Sie vergleichsweise wartungsarm und besitzen eine einfache Betriebsführung sowie hohe Wirkungsgrade.

Für die Bilanzierung der Batteriespeicher im Modell wird dahingehend nachfolgend auf den Wirkungsgrad beim Be- und Entladen sowie auf die energetischen Verluste während der Speicherung eingegangen. Im Anschluss daran wird auf die Dimensionierung der Speicher eingegangen und abschließend die Betriebsführung des Speichers behandelt.

Wirkungsgrad und Verluste

Die Speicherung von Strom in Batteriespeichern und deren anschließende Nutzung ist verbunden mit Verlusten, die bei der Be- und Entladung des Batteriespeichers sowie durch Selbstentladung während der Ruhephasen auftreten. Infolgedessen erreichen Batteriespeicher Wirkungsgrade von 60-98 %. Beeinflusst wird der Wirkungsgrad u. a. durch die Zellchemie und die Bauart des Batteriespeichers. Blei-Batteriespeicher z. B. besitzen Wirkungsgrade von 60-90 % und Lithium-Ionen-Batteriespeicher 80-98 % (Andreas R. Köhler *et al.* 2018). Der angeführte Wirkungsgrad gilt für einen Vollzyklus, der das Beladen, Zwischenspeicherung und Entladen des Batteriespeichers beinhaltet. Sowohl beim Beladen als auch beim Entladen treten Verluste auf, die jeweils bis zu 20 % ausmachen

können. Hieraus resultiert ein Wirkungsgrad von rund 80-99 % für den Lade- und Entladeprozess. Im Durchschnitt können für Lithium-Ionen-Batteriespeicher Lade- und Entladewirkungsgrade von 95 % und für Blei-Batteriespeicher von 90 % angesetzt werden (Andreas R. Köhler *et al.* 2018).

Die Verluste durch Selbstentladung, in Folge von chemischen Reaktionen innerhalb des geladenen Batteriespeichers, liegen i. d. R. unter einem Prozent pro Tag, sind jedoch abhängig von der Bauart und Zellchemie des Batteriespeichers. Die Selbstentladung von Lithium-Ionen-Batteriespeichern liegt etwa bei 0,1 % pro Tag und bei Blei-Batteriespeichern zwischen 0,01 % und 0,4 % pro Tag (Andreas R. Köhler *et al.* 2018).

Speicherdimensionierung

Zur Integration von Stromspeicher im Modell müssen Annahmen zur Dimensionierung der Speichergröße/-kapazität getroffen werden. Diese richtet sich nach dem Anwendungsfall, des Stromüberschusses sowie nach ökonomischen Gesichtspunkten. Wird der Stromspeicher z. B. zu groß dimensioniert, steigen der Flächenbedarf und die Investitionskosten, wohingegen der Speicher nicht umfassend genutzt werden kann. Ist der Speicher hingegen zu klein dimensioniert, kann das Überangebot an regenerativem Strom nur bedingt genutzt werden. In beiden Fällen ist der Einsatz des Speichers aus wirtschaftlichen und ökologischen Gesichtspunkten sowie aus Effizienzgesichtspunkten fraglich. Untersuchungen von Weniger, J. *et al.* (2013), Weniger, J. *et al.* (2014) zur Dimensionierung von PV-Anlagen und Batteriespeichern kommen zu dem Schluss, dass „[...]die wirtschaftlich interessante Spannweite eines PV-Speichersystems zwischen 0,8-1,5 kWp/MWh für die PV-Anlage und 1,1-1,5 kWh/MWh für den Speicher..]“ liegt (Weniger, J. *et al.* 2013, S. 75). Hieraus abgeleitet ergibt sich ein Verhältnis von erzeugter solarer Leistung und Speicherkapazität von 0,7 bis 1,0 kW_{pPV}/kWh_{sp}. Weiterhin weisen Weniger, J. *et al.* (2013) darauf hin, dass PV-Systeme mit großen Speichern aus ökonomischer Sicht derzeit noch uninteressant sind.

Eine weiterer Dimensionierungsansatz wurde in Moshövel, J. *et al.* (2015) angewendet. Zur Bestimmung der Batteriekapazität werden der Energiebedarf und die Energiebereitstellung durch die PV-Anlage gegenübergestellt. Hierbei gilt, wenn „[...]die jährlich erzeugte Energiemenge des PV-Systems E_{PV} größer ist als der jährliche Energiebedarf E_{Bedarf} des Haushaltes, dann wird die nutzbare Kapazität der Batterie C_{bat} auf die Hälfte des täglichen Bedarfes skaliert...]“:

$$E_{PV}[kWh] > E_{Bedarf} [kWh] : C_{bat} = 0,5 \times \frac{E_{Bedarf}}{365}$$

Liegt hingegen die jährlich erzeugte Energiemenge des PV-Systems unter dem jährlichen Energiebedarf des Haushaltes, dann wird die nutzbare Kapazität der Batterie auf die

Hälfte der täglichen Erzeugung skaliert. Zur Abschätzung der erzeugten Energiemenge des PV-Systems kann die PV-Nennleistung (kWp) mit einem für Deutschland typischen Wert von ca. 1.000 h für die jährlichen Vollaststunden multipliziert werden.

$$E_{PV}[kWh] < E_{Bedarf}[kWh] : C_{bat} = 0,5 \times \frac{E_{PV}[kWp] * 1000}{365}$$

5.3.2 Wärmespeicher

Wärmespeicher werden zur Speicherung thermischer Energie verwendet. Sie können anhand ihrer Speicherdauer, der Temperatur, des Speichermediums und des Speicherprinzips differenziert werden. Sie reichen von kleinen nur wenige Liter umfassende bis hin zu großen saisonalen Speichern mit mehreren Tausend Kubikmetern. Die Speicherdauer reicht hierbei von wenigen Stunden (z. B. Pufferspeicher) bis hin zu mehreren Wochen und Monaten (z. B. saisonale Wärmespeicher). Die Speichertemperatur reicht von Kältespeichern im Bereich von 5-18°C bis zu Hochtemperaturspeichern mit bis zu 600°C.

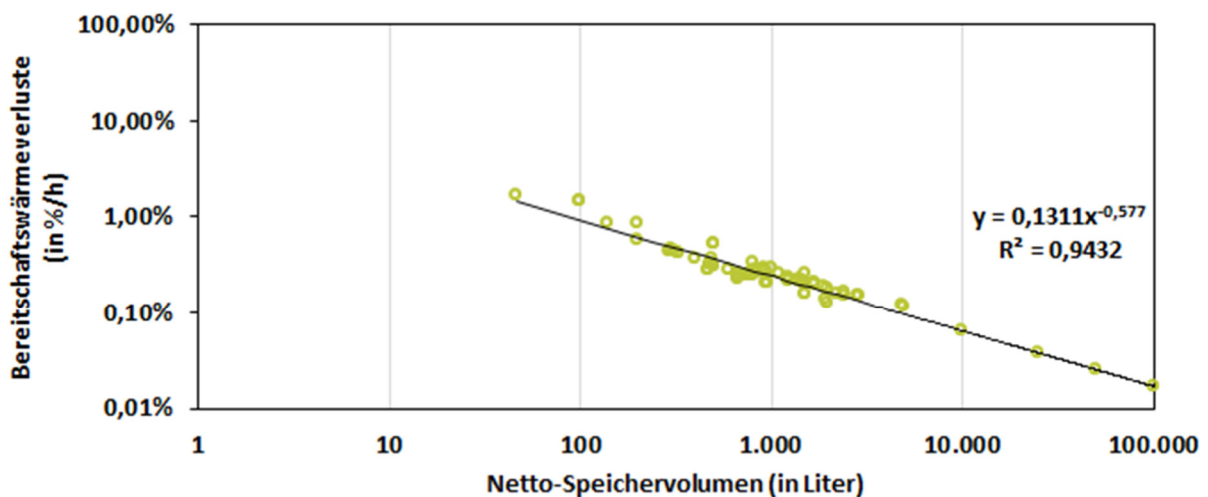
Zur Speicherung der thermischen Energie kommen unterschiedliche Konzepte und Speichermaterialien zur Anwendung. Das am häufigsten verbreitete Wärmeträgermedium ist Wasser (Stadler, I. 2014), da es aufgrund seiner physikalischen Eigenschaften, seiner Umweltverträglichkeit und den geringen Kosten viele Vorteile besitzt. Weitere Wärmeträgermedien sind Thermoöle, Salze sowie diverse Feststoffe (Beton und Eisenoxidsteine), die bei Temperaturen über 100°C eingesetzt werden. Soll die Wärme über einen längeren Zeitraum zwischengespeichert werden, dann kommen oberirdische, teilvergrabene und vergrabene Speicher mit Wasser, Kies/Wasser oder in Form von Erdsonden zur Anwendung.

Nachfolgend werden Niedertemperaturspeicher betrachtet, die Wärme für die Raumheizung und Trinkwarmwasser bereitstellen können und eine Speicherdauer von Tagen bis zu mehreren Monaten besitzen. Die Berechnungen im Modell erfolgen anhand vereinfachter Einschichtmodelle. Bei einem solchen Einschichtmodell werden die Temperaturschichtungen, die innerhalb eines Wärmespeichers auftreten, vernachlässigt. Hierdurch bleiben interne Temperatur-„Verluste“ z. B. durch interne Zirkulation und Einströmung unberücksichtigt. Es wird angenommen, dass die getroffene Modellierungsschärfe für die weiteren Berechnungen in der vorliegenden Arbeit den Anforderungen genügt.

Speicherverluste

Wie auch zuvor bei den elektrischen Speichern ist die Zwischenspeicherung von thermischer Energie mit Verlusten verbunden. Anders als bei den elektrischen Batteriespeichern geht die zur Verfügung stehende Energie infolge des Temperaturunterschieds zwischen Speicherinhalt und Umgebung aufgrund von Wärmetransfer an die Umgebung ver-

loren. Hierbei kommt dem Oberflächen-Volumen-Verhältnis des Speichers, der Temperaturdifferenz zur Umgebung und der Dämmung des Speichers eine relevante Bedeutung zu. So weisen kleinere Speicher gegenüber größeren Speichern, aufgrund des ungünstigeren Oberflächen/Volumen-Verhältnisses, relativ gesehen, höhere Wärmeverluste auf (Abb. 45). Hierdurch ist der Nutzungsgrad bei größeren Speichern höher als bei kleineren Speichern.



Grafik: Norbert Krauß

Daten: Herstellerangaben; Eigene Auswertungen

Abb. 45: Bereitschaftswärmeverlust (in %/h) in Abhängigkeit des Speichervolumens (Nettoinhalt in Liter) auf Basis von Herstellerangaben

Für die Berechnungen wird von einer verlustfreien Be- und Entladung ausgegangen. Differenzen zwischen der vom Kollektor erzeugten und dem Speicher zugeführten Energie werden dahingehend der Übertragung von Erzeuger zu Speicher durch ein Rohrnetz zugeschlagen. Vereinfachend werden daher für die Wärmespeicherung ausschließlich Verluste in Folge der Selbstentladung (Wärmeabgabe an die Umgebung) berücksichtigt.

Dimensionierung von Wärmespeichern

Bei der Dimensionierung der Wärmespeicher kommen dem Anwendungsfall (Bereitstellung von Trinkwarmwasser und/oder Heizwärme), dem Versorgungssystem und der beabsichtigten Speicherdauer (Kurzzeit- oder Langzeitspeicherung) zentrale Bedeutung zu. In der Literatur liegen zur Auslegung und Dimensionierung von Wärmespeichern unterschiedliche Ansätze und Kennwerte vor. Darüber hinaus hat der gewünschte Grad der solaren Deckung erheblichen Einfluss auf die Speicherdimensionierung (vgl. Tab. 33).

So bedingen höhere solare Deckungsgrade einen erhöhten Bedarf an Speichervolumen, da die solar erzeugte Wärme über einen längeren Zeitraum und für einen größeren Bedarf vorgehalten werden muss, sollte aufgrund von Witterungsverhältnissen nicht genügend solare Wärme zur Verfügung stehen.

Tab. 33: Speicherdimensionierung in Abhängigkeit des angestrebten solaren Deckungsgrads

Solarer Deckungsgrad in %	>50	>60	>70	>80	>90	100
Speicher in m ³ / m ² Kollektorfläche	0,15	0,20	0,25	0,30	0,40	0,50

Quelle: Sonnenhaus-Institut e.V.¹⁸

Zur Dimensionierung von Wärmespeichern für einzelne Wohnungen oder Wohngebäuden werden in der Literatur spezifische Kennwerte oder Berechnungsformeln als Orientierungswerte verwendet. Verbreitet sind Angaben zum spezifischen Speichervolumen in m³ oder Liter je m² Kollektorfläche, je Liter und kWh Trinkwarmwasserverbrauch oder je m² beheizter Wohn- bzw. Gebäudenutzfläche. Die Bandbreite des spezifischen Speichervolumens liegt je nach Anwendungsfall (Bereitstellung von Trinkwarmwasser und/oder Heizwärme) bei 40-500 Liter je Quadratmeter Kollektorfläche (Kaltschmitt, M. *et al.* 2006, Peuser, F. A. *et al.* 2008, VDI 6002 2014, Quaschnig, V. 2015, Burmeister, F. *et al.* Juli 2012). Für einen solaren Deckungsgrad von rund 60 % für die Trinkwarmwasserversorgung geht man von einer Kollektorfläche von 0,8-2,0 m² je Person und 50-100 Liter Speichervolumen je m² Kollektorfläche aus. Infolgedessen ergibt sich ein Speichervolumen von 40-200 l je Person. Für die solare Trinkwasser- und Heizungsunterstützung (Kombianlagen) liegen die Kollektorflächen bei etwa 0,8-4,0 m² je Person und das spezifische Speichervolumen für einen solaren Deckungsgrad von bis zu 35 % bei 60-300 l/m² Kollektor, woraus sich ein Speichervolumen von 48-1200 l je Person ergibt. Die große Spreizung der Speichervolumen resultiert u. a. aus den unterschiedlichen Deckungsgraden sowie den Unsicherheiten zu den lokalen Rahmenbedingungen, Nutzer/innenverhalten und Gebäudestandard. Ein Speichervolumen von bis zu 100 l/m² Kollektorfläche kann zu einem solaren Deckungsgrad von bis zu 20-35 % führen. Für solare Deckungsgrade von über 50 % werden Speichervolumen von über 100 l/m² Kollektorfläche benötigt. Eine Deckung von 90-100 % ist nur in besonders gut gedämmten Gebäuden (Sonnen- und Passivhäusern) zu erreichen. Darüber hinaus liegen z. B. aus den DIN-Normen DIN 18599, DIN 4701 und VDI 6002 sowie aus Studien Berechnungsformeln zur Abschätzung des benötigten Speichervolumens vor (vgl. Tab. 34).

Bei solaren Nahwärmesystemen mit Langzeitwärmespeichern liegt die mittlere Kollektorfläche je Person bei rund 6-10 m² (Ochs, F. & PKi k.A.). Das Speichervolumen in Beispielprojekten liegt zwischen 1,4-9,9 m³ je m² Kollektorfläche. Langzeitwärmespeicher mit Wasser als Wärmeträgermedium weisen mit 1,4-2,1 m³ eine vergleichsweise geringe Streuung auf. Die größeren Speichervolumina von bis zu 9,9 m³ je Quadratmeter Kollektorfläche wurden bei Kies/Wasser-Wärmespeichern, Erdsonden-Speichern und Speichern mit einem anderen Wärmeträgermedium als Wasser realisiert (Mangold, D. *et al.*

¹⁸ <https://www.sonnenhaus-institut.de/solarheizung/energiebilanz-2.html>

2007, Mangold, D. *et al.* 2012, Ochs, F. 2013). Ausgehend von einer Kollektorfläche von 6-10 m² und einem Speichervolumen von 1,4-2,1 m³ ergibt sich ein Langzeitspeichervolumen je Person von 8-21 m³.

Tab. 34: Berechnungsansätze zur Bestimmung des Speichervolumens in Abhängigkeit des Anwendungsfalls

Anwendung	Quelle	Formel bzw. Berechnungsansatz	Anmerkungen
Trinkwarmwasser	DIN V 18599-8:2011-12	$V_S = \frac{Q_{w,b,day} * f_N * 860}{(\theta_{w,av} - \theta_K) * n_S}$	<p>$Q_{w,b,day}$: Täglicher Trinkwarmwasserbedarf (in kWh)</p> <p>f_N: Nutzungsfaktor ($1,85 * n_{WE}^{-0,42}$)</p> <p>$\theta_{w,av}$: Mittlere Speichertemperatur (in °C)</p> <p>θ_K: Kaltwassertemperatur (in °C)</p> <p>n_S: Speichernutzungsgrad (stehend 0,95; liegend 0,90)</p>
Trinkwarmwasser + Heizwärme	Peuser, F. A. <i>et al.</i> (2008)	$V_S = V_{S,TWW} * \left(\frac{A_{FK}}{A_{FK,TWW}} \right)^{EXP}$	<p><i>EXP</i>: 1,30-1,35 (1,32 erfahrungsgemäß)</p> <p>V_{TWW}: Speichervolumen für Trinkwarmwasser (in Liter)</p> <p>A_{FK}: Kollektorfläche (in m²)</p> <p>$A_{FK,TWW}$: Kollektorfläche für reine Trinkwarmwasseranlagen (in m²)</p>
Trinkwarmwasser + Heizwärme	DIN 4701-10	$V_S = 10,5 * A_N^{0,7}$	<p>A_N: Gebäudenutzfläche in m²; bei Wohngebäuden die unterkellert sind und ≤ 2 Wohnungen besitzen entspricht 1 m² Wohnfläche 1,2 m² Gebäudenutzfläche; bei allen anderen Wohngebäuden entspricht 1 m² Wfl. 1,3 m² A_N.</p>
Trinkwarmwasser	DIN 4701-10	$V_S = 6 * A_N^{0,7}$	<p>V_S: In Liter bis 1.000 l; bei größeren Speichern werden mehrere kleinere Speicher (bis 1.000 l) kombiniert.</p> <p>A_N: siehe Trinkwarmwasser + Heizwärme</p>
Trinkwarmwasser	Diefenbach, N. <i>et al.</i> (2002)	$V_S = -2,24 * 10^{-8} * Q_{TW} + 0,028 * Q_{TW} + 170$	<p>V_S: Speichervolumen für Trinkwarmwasser (in Liter)</p> <p>Q_{TW}: Trinkwarmwasserbedarf (in kWh)</p>

5.3.3 Integration der Speicher im Modell

Ausgehend von den zuvor dargelegten Daten und Erfahrungswerten werden für die Berechnung im Modell für Strom- und Wärmespeicher Annahmen zu den Wirkungsgraden, Energieverlusten und Dimensionierung getroffen. Aspekte, wie Flächenverbrauch oder ökonomische Gesichtspunkte, blieben hierbei jedoch unberücksichtigt. Weiterhin wurde eine Prozesskette erarbeitet, durch die geregelt wird, wann das Speichermodul zum Einsatz kommt.

Wirkungsgrad, Energieverluste und Dimensionierung

Der nachfolgenden Tab. 35 können die getroffenen Annahmen für die Wirkungsgrade, Energieverluste infolge von Selbstentladung sowie die zugrunde gelegten Dimensionierungsansätze entnommen werden.

Tab. 35: Annahmen zu den Energiespeichern im Modell

	Stromspeicher	Wärmespeicher	
Wirkungsgrad & Verluste	Wirkungsgrad be- und entladen:	95,0 %	100 %
	Wirkungsgrad Vollzyklus:	90,25 %	100 %
	Selbstentladung:	0,0042 %/h	$1,311 * V_{WS}^{-0,577}$ in %/h
	Lade- und Entladeleistung:	Vollständiges Beladen bzw. Entladen innerhalb 1 h	Vollständiges Beladen bzw. Entladen innerhalb 1 h
Dimensionierung	$E_{PV} > E_{Bedarf}$:	$0,5 \times \frac{E_{Bedarf}}{365}$	
	$E_{PV} < E_{Bedarf}$:	$0,5 \times \frac{E_{PV}[kWp] * 1000}{365}$	
	Gebäudespeicher:		0,2 m ³ /m ² Kollektor
	Nahwärme + Langzeitspeicher:		1,8 m ³ /m ² Kollektor

Für die Stromspeicherung werden in der vorliegenden Arbeit Lithium-Ionen-Speicher zugrunde gelegt.

V_{WS} = Speichervolumen in Liter

$\Delta T = 45$ K, Wärmekapazität 1,163 Wh/kg*K, Dichte 1000 kg/m³ für Wasser.

Prozesskette

Der Einsatz der Speicher, also das Beladen, Zwischenspeichern und Entladen von Energie, ist verbunden mit gewissen Voraussetzungen. So kann Energie (elektrische oder thermische) nur zwischengespeichert werden, wenn diese durch regenerative Energieanlagen bereitgestellt wird. Energie durch den Speicher bereitgestellt werden kann wiederum nur, wenn der Speicher zuvor beladen wurde. Zur Abbildung dieser Voraussetzungen wurden im Modell die nachfolgenden spezifischen WENN-DANN Bedingungen formuliert, die gleichermaßen auf Strom- und Wärmespeicher zutreffen.

Das Beladen des Energiespeichers erfolgt dann, WENN:

1. die erzeugte Energie (PV, Solarthermie, Biomasse) größer ist als der zum gleichen Zeitpunkt vorliegende Energiebedarf und $E_{ERZ} > E_{BED}$
2. der Energiespeicher vollständig oder teilweise entladen ist, so dass der Speicher die überschüssige Energie (aus Punkt 1.) vollständig oder teilweise aufnehmen kann. $0 \leq E_{ESP} < K_{ESP}$

Die Entladung erfolgt hingegen, WENN:

1. die erzeugte Energie (PV, Solarthermie, Biomasse) kleiner ist, als der zum gleichen Zeitpunkt vorliegende Energiebedarf und $E_{ERZ} < E_{BED}$
2. der Energiespeicher vollständig oder teilweise geladen ist, so dass der Speicher die gespeicherte Energie vollständig oder teilweise zur Deckung des Energiebedarfs einsetzen kann. $0 < E_{ESP} \leq K_{ESP}$

Sind die Bedingungen für die Beladung oder Entladung des Energiespeichers nicht erfüllt, dann verbleibt die gespeicherte Energie im Speicher, abzüglich der durch Selbstentladung entstehenden Verluste.

6 Anwendung des Verfahrens an einem Fallbeispiel

Nachdem in den Kapiteln zuvor das Berechnungsverfahren eingehend beschrieben wurde, erfolgt im vorliegenden Kapitel die Anwendung des Verfahrens an einem Fallbeispiel. Das Fallbeispiel dient dem Zweck der Justierung sowie der Prüfung des Verfahrens.

Bevor die Ergebnisse des Berechnungsverfahrens für das Fallbeispiel präsentiert werden, werden zunächst die für die Berechnungen relevanten Input-Daten zum Fallbeispiel zusammengetragen und dargelegt (Kapitel 6.1). Hierzu gehören z. B. Daten zu Haushalten, Bevölkerung, Wohngebäuden, Energiekennwerte und Klimadaten. Merkmale und Kennwerte, für die keine spezifischen Daten zum Fallbeispiel vorlagen oder nicht verfügbar waren, wurden um literaturgestützte plausible Setzungen ergänzt. Im Anschluss daran werden im Abschnitt 6.2 der Jahresenergiebedarf (Strom-, Warmwasser- und der Heizenergiebedarf) und in Abschnitt 6.3 die ermittelten Potenziale der regenerativen Energien für das Bilanzjahr vorgestellt. In beiden Abschnitten wird auf bestehende Studien und den darin ermittelten Ergebnissen zum Vergleich verwiesen. In Abschnitt 6.4 werden die Ergebnisse der Lastmodellierung vorgestellt. Das Kapitel schließt mit den Berechnungsergebnissen der Sensitivitätsstudien (Abschnitt 6.5) ab.

6.1 Das Fallbeispiel

Für die Anwendung des Modells wurde ein Fallbeispiel bzw. eine Fallstudiengemeinde ausgewählt. Bei der ausgewählten Fallstudie handelt es sich um die kreisfreie Stadt Landau in der Pfalz. Die Kreisfreie Stadt liegt im südlichen Rheinland-Pfalz und ist Teil der Metropolregion Rhein-Neckar. Zum Zeitpunkt der Untersuchung ist Landau i. d. Pfalz Wohnort von rund 42.422 Einwohnern und Einwohnerinnen. Das Gebiet der Stadt umfasst 82,96 km² und ist stark durch den Weinbau geprägt. Die Stadt besitzt eine Altstadt, die im Zentrum der Kernstadt liegt. Die kreisfreie Stadt besitzt neben der Kernstadt acht weitere Ortsteile (Arzheim, Dammheim, Godramstein, Mörlheim, Mörzheim, Nußdorf, Queichheim und Wollmesheim), sowie eine Exklave im Pfälzerwald. Da es sich bei der Exklave Oberhaingeraide ausschließlich um einen Stadtwald handelt und dort keine Einwohner wohnhaft sind wird die Exklave bei den weiteren Betrachtungen vernachlässigt. Die Wahl des Fallbeispiels wurde auf der Grundlage getroffen, da es zum Zeitpunkt des Untersuchungsbeginns eine von mehreren Fallstudiengemeinden im Projekt „EASE“ war. Im weiteren Verlauf wurden darüber hinaus parallel zum Promotionsvorhaben weitere Projekte durchgeführt in dem die Gemeinde Landau in der Pfalz Untersuchungsgegenstand war. Darüber hinaus konnte auch auf die Ergebnisse der Diplomarbeit des Autors, zum Potenzial von Photovoltaik in der Gemeinde, zurückgegriffen werden. Insgesamt stand somit eine breite Datengrundlage für die Untersuchung und die spätere Validierung der Untersuchungsergebnisse zur Verfügung.

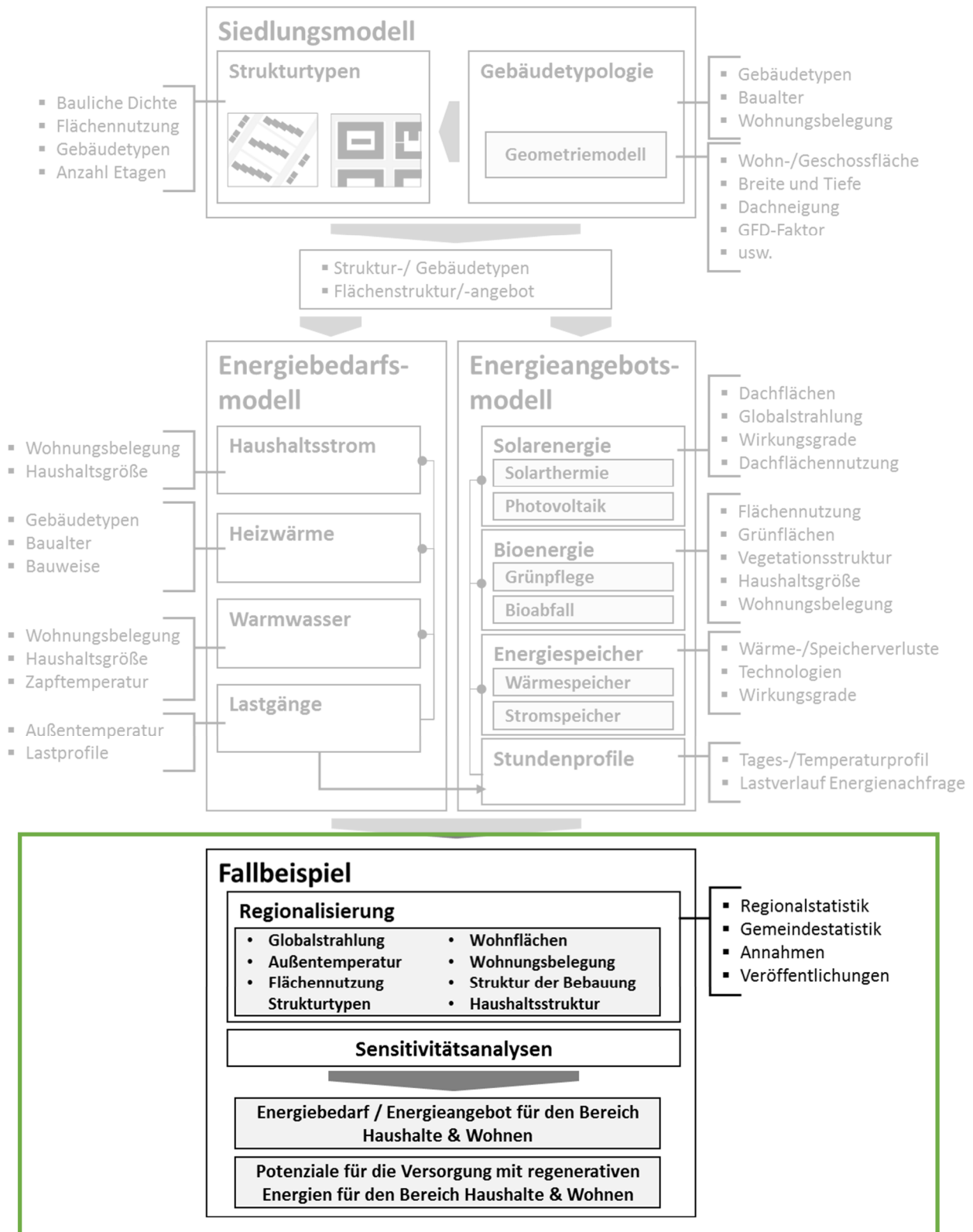


Abb. 46: Modellstruktur – Fokus Anwendung am Fallbeispiel (Eigene Darstellung)

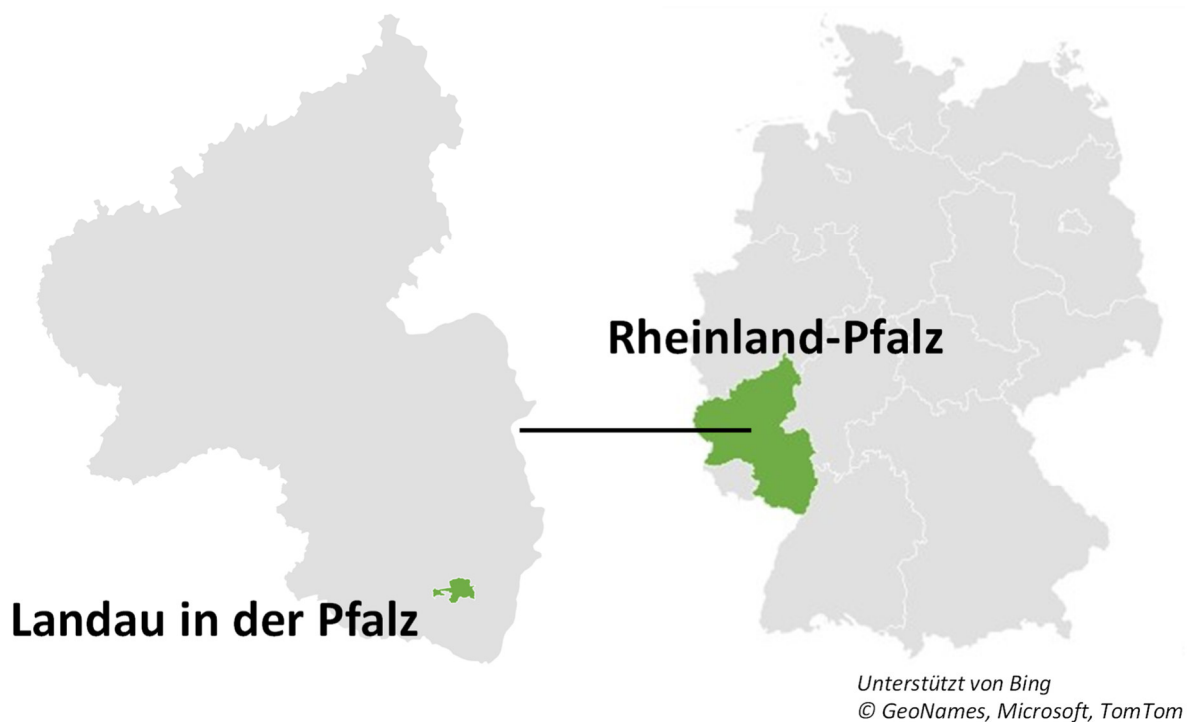


Abb. 47: Geografische Lage des Fallbeispiels Landau in der Pfalz.

Gemäß den Erläuterungen in den Kapiteln 4.1, 4.2 und 4.3 werden für die Berechnungen der Energieverbräuche im Fallbeispiel spezifische, die kreisfreie Stadt Landau in der Pfalz betreffende Daten zum Wohngebäudebestand und zu den Haushalten benötigt. Da die benötigten Daten zur Fallstudie auf mehrere Datenbanken bzw. Quellen verteilt sind, müssen die spezifischen Daten und Informationen zusammengetragen werden. Hierzu wird mehrheitlich auf amtliche Statistiken, insbesondere auf die im Zensus 2011 erhobenen Daten, zurückgegriffen. Zur Abdeckung darüber hinaus bestehender Datenlücken wurden diverse Quellen (Literatur, online-Datenbanken, usw.) recherchiert und ausgewertet.

6.1.1 Bestand und Struktur der Wohngebäude

Zentraler Bestandteil des Verfahrens ist die Erarbeitung der Gebäudevertreter und darauf aufbauend die Strukturtypen. Hierzu werden die in Kapitel 3 angeführten Daten benötigt. Für die zugrunde liegende Fallstudie wurde diesbezüglich mehrheitlich auf Daten aus den Ergebnissen des Zensus 2011 zurückgegriffen. D. h., dass die Berechnungen und die resultierenden Ergebnisse sich auf den Bauwerksbestand im Mai 2011 beziehen. Darüber hinaus sind auch Daten und Informationen z. B. aus Immobilienportalen und wissenschaftlichen Studien eingeflossen. Nachfolgend werden dahingehend zum einen die, gemäß Kapitel 3, berechneten Kennwerte ausgewiesen und zum anderen deren Daten Grundlagen sowie Annahmen dargelegt.

Wohngebäude, Wohnungen und Wohnfläche

Für die Auswertung wurden alle Wohngebäude (ohne Wohnheime), die darin befindlichen Wohnungen und deren Wohnflächen einbezogen. Die Wohngebäude wurden in die beiden Gruppen „freistehend“ und „gereiht“ unterteilt. Die Gruppe „gereiht“ umfasst alle Wohngebäude, die in den Zensus-Daten als „Doppelhaushälfte“, „gereiht“ und „anderer Gebäudetyp“ deklariert sind. Die Gruppe „anderer Gebäudetyp“ stellt hierbei eine Besonderheit dar. Es handelt sich hierbei um Wohngebäude, die keiner der Gruppen „freistehend, gereiht und Doppelhaushälfte“ entspricht. Ein Beispiel eines solchen Gebäudes ist der Vier-Seiten-Hof. Die Zuordnung der Gruppe „anderer Gebäudetyp“ zur Gruppe „gereiht“ beruht auf der Annahme, dass es sich mehrheitlich um Gebäude in dörflichen Gemeindeteilen handelt, die jedoch im betreffenden Fallbeispiel und Bundesland mehrheitlich eine verdichtete Bauweise aufweisen. Aufgrund der verhältnismäßig geringen Anzahl an Gebäuden in dieser Gruppe ist darüber hinaus auch von einem nur geringen Einfluss bzw. Fehler auszugehen. In der nachfolgenden Tab. 36 sind die relevanten Daten hinterlegt.

Tab. 36: Eingangsdaten für Wohngebäude, Wohnungen und Wohnfläche im Fallbeispiel

Gebäudetyp	Bauweise	Wohngebäude Anzahl	Wohnungen Anzahl	Wohnfläche m ²	Whg / WG Anzahl	Wfl. / WE m ² /WE
EZH	freistehend	4.626	5.286	684.908	1,1	148,1
	gereiht	3.381	3.734	422.568	1,1	125,0
KMH	freistehend	503	1.995	165.825	4,0	329,7
	gereiht	856	3.427	277.776	4,0	324,5
MMH	freistehend	131	1.033	81.572	7,9	622,7
	gereiht	334	2.889	224.251	8,6	671,4
GMH	freistehend	36	776	59.413	21,6	1.650,4
	gereiht	85	1.742	107.535	20,5	1.265,1

Geschossigkeit

Daten, amtlicher Statistiken, die Auskunft oder Hinweise zur Geschossigkeit des Wohngebäudebestands geben können, liegen für das Fallbeispiel nicht vor. Vereinzelt konnten Informationen aus öffentlich zugänglichen Immobilienportalen (z. B. Immonet, Immowelt, Immobilienscout24, EBay Kleinanzeigen) erhoben werden. Diese Daten sind jedoch nicht repräsentativ und bieten lediglich eine ergänzende Datenquelle. Insbesondere für den Bestand der Mehrfamilienhäuser ist die Datenlage in den Immobilienportalen für das Fallbeispiel nicht aussagekräftig, da nur wenige Datensätze vorhanden sind. Die Untersuchungen zum gesamten Datensatz, wie bereits in Abschnitt 3.1.2 dargelegt wurde, zeigt tendenziell einen Zusammenhang zwischen baulicher Dichte, Verstärkerungsgrad

und der Anzahl der Vollgeschosse. Auf Basis dieses Zusammenhanges wurden auch die nachfolgenden Annahmen getroffen.

Tab. 37: Annahmen zur Anzahl und Aufteilung der Vollgeschosse, differenziert nach Gebäudetyp

Gebäudetyp	Bauweise	Vollgeschosse			
		Anzahl		Anteil in %	
EZH	freistehend	1	2	40	60
	gereiht	2	3	60	40
KMH	freistehend	2	3	60	40
	gereiht	2	3	60	40
MMH	freistehend	3	4	60	40
	gereiht	3	4	60	40
GMH	freistehend	4	5	60	40
	gereiht	4	5	60	40

Ergänzend konnte auf Untersuchungen, die im Rahmen des abgeschlossenen Projektes „EASE“¹⁹ durchgeführt wurden, zurückgegriffen werden. Hierbei handelt es sich um Fotos und Auswertungen von Vorortbegehungen. Auf Grundlage der zur Verfügung stehenden Informationen wurden die in Tab. 37 aufgeführten Annahmen für die Geschossigkeit der Gebäudevertreter getroffen.

Die prozentuale Aufteilung der Vollgeschosse im Bestand beruht auf der Auswertung von Immobiliensteckbriefen, Strukturtypenkennblättern und Studien (u.a. Loga, T. *et al.* 2005). Aufgrund der zugrunde liegenden Daten spiegeln die Annahmen tendenziell die allgemeine Bauweise wider und nicht die spezifischen lokalen Gegebenheiten des Fallstudiengebiets.

Gebäudebreite und -tiefe

Hinweise, die Aufschluss zur mittleren Gebäudebreite bzw. Gebäudetiefe für die Gebäude der Fallstudie liefern, liegen keine vor bzw. sind dem Autor nicht bekannt. Aufgrund dessen wird für die verschiedenen Gebäudevertreter jeweils mit einer mittleren Gebäudebreite bzw. Gebäudetiefe, gemäß Kapitel 3.2.3 Tab. 9, gerechnet (Tab. 38).

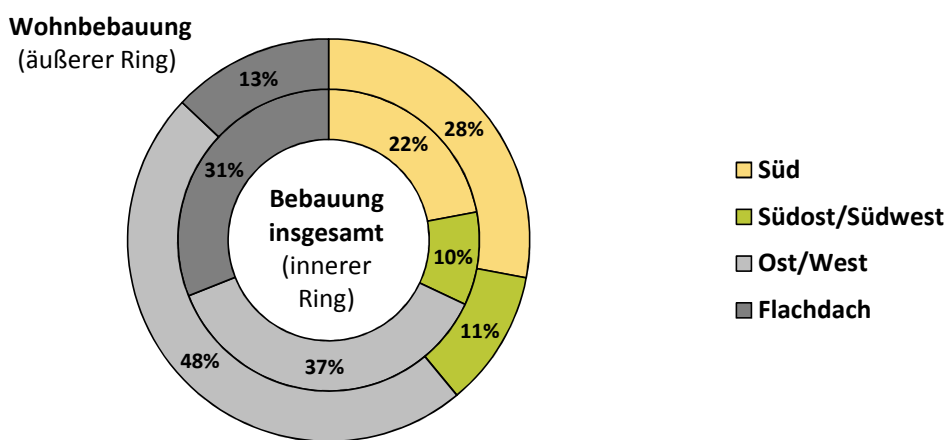
Tab. 38: Annahmen zur Länge der Giebel- bzw. Firstseite

Wohngebäude mit	Länge Giebel- bzw. Firstseite in m
1-2 Wohnungen (EZH)	10
3-6 Wohnungen (KMH)	12
7-12 Wohnungen (MMH)	15
13 und mehr Wohnungen (GMH)	20

¹⁹ EASE - Energetische Aufwertung und Stadtentwicklung. Online unter: <https://www.ioer.de/projektarchiv/p-308/>

Ausrichtung der Gebäudedachflächen

Für das Fallbeispiel kann auf Analyseergebnisse und Daten aus einer vorausgegangenen Arbeit (Krauß, N. 2009) zurückgegriffen werden. Die darin durchgeführten Analysen sind Bestandteil einer Untersuchung von drei Methoden zur Abschätzung des solarenergetischen Potenzials, in der u. a. Hausumringe, Daten zur Flächennutzung und Luftbilder verwendet wurden²⁰. Anhand der zur Verfügung stehenden Daten wurden in ausgewählten Untersuchungsgebieten manuell die Dachform (Flachdach und Dach mit Neigung) und deren Ausrichtung erfasst und in einem Tabellenkalkulationsprogramm ausgewertet. Die daraus abgeleiteten Ergebnisse für das Fallbeispiel sind in Abb. 48 dargestellt.



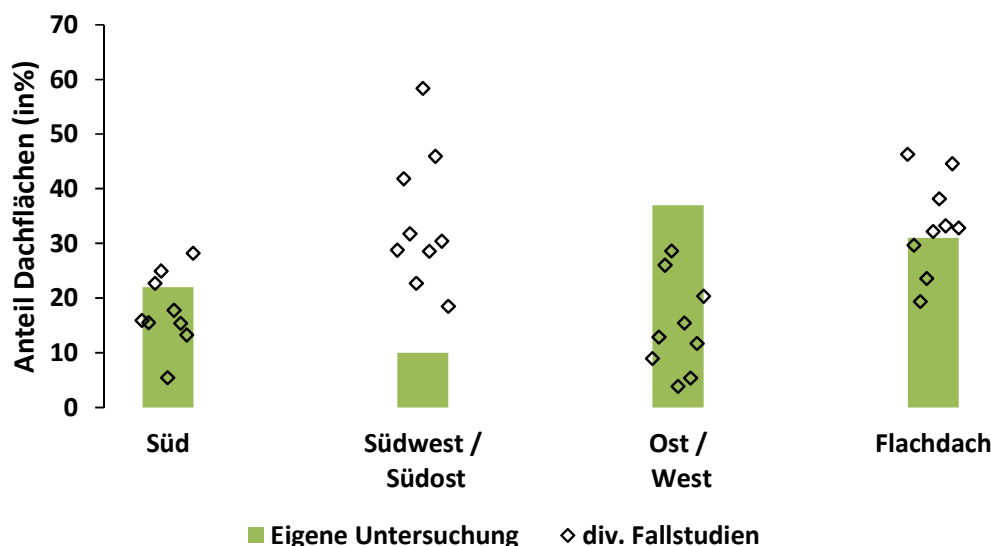
Grafik: Norbert Krauß
Daten: Krauß (2009)

Abb. 48: Verteilung der Dachausrichtung für Flächen mit Wohnbebauung (äußerer Ring) und gemischter Bebauung (innerer Ring) in %

Wie in Abb. 48 gezeigt wird, unterscheidet sich die Verteilung der Dachflächenausrichtung für Flächen mit überwiegend Wohnbauten, gegenüber der Verteilung für die gesamte untersuchte Siedlungsfläche. Dies beinhaltet Flächen mit Wohnbebauung, Industrie- und Gewerbeflächen, Flächen mit gemischter Nutzung und Flächen mit besonderer funktionaler Prägung. Daraus geht hervor, dass der Flächenanteil von Flachdächern in erheblichem Maße durch die Flächen mit Industrie und Gewerbe, Mischnutzung und besonderer funktionaler Prägung beeinflusst wird. Auch die Berücksichtigung von Garagen oder anderen nicht für Wohnzwecke genutzte Bauwerke beeinflussen die Aufteilung der Dachart. Dies zeigt sich auch in der Abb. 49, in der die Dachflächenstruktur von mehreren Untersuchungsgebieten zusammen mit dem Fallbeispiel dargestellt wird. In den ausgewerteten Untersuchungen wurde ebenfalls der gesamte Gebäudebestand berücksichtigt. Die Bandbreite reicht von rund 20 % bis zu 50 % Flächenanteil von Flachdächern. Der flächengewichtete Anteil von Flachdächern liegt bei rund 31 %. Der Anteil von Flachdächern im Fallbeispiel beträgt im gesamten Untersuchungsgebiet rund 31 %, bezogen

²⁰ Die freundlicherweise von der Gemeindeverwaltung der Stadt Landau in der Pfalz zur Verfügung gestellt wurden.

auf die Dachfläche (Abb. 49). In Flächen, die mehrheitlich durch Wohnbebauung geprägt sind, besitzen Flachdächer mit etwa 13 % Flächenanteil eine geringere Bedeutung (siehe Abb. 48). Die vergleichsweise geringe Relevanz deckt sich auch mit Untersuchungen zum deutschen Wohngebäudebestand (Diefenbach, N. *et al.* 2010).



Grafik: Norbert Krauß

Daten: Badenova (2012a, 2012b, 2013, 2014, 2015a-d, 2016)

Abb. 49: Ausrichtung und Anteil der Dachflächen im Fallbeispiel im Vergleich zu Literaturdaten

Ausgehend von den zugrunde liegenden Informationen werden für die Modellierung die Dachflächen in Flachdächer und Satteldächer jeweils differenziert nach Gebäudetyp aufgeteilt (Tab. 39).

Tab. 39: Annahmen zum Anteil der Dachformen Flachdach und Satteldach

Dachform	EZH (Wohngebäude mit 1-2 Wohnungen)		KMH, MMH, GMH (Wohngebäude mit 3 und mehr Wohnungen)	
	freistehend	gereiht	freistehend	gereiht
Flachdach	10	10	20	20
Satteldach	90	90	80	80

Neigung der Gebäudedachflächen

Die Dachneigung ist für die solarenergetische Nutzung ein zentrales Merkmal und beeinflusst den erzielbaren Ertrag (vergleiche Abschnitt 5.1.4). Trotz intensiver Forschung und vielfältiger Untersuchungen, z. B. für die Erstellung von Solarkatastern, liegen bisher für Deutschland keine flächendeckenden Daten zur Verteilung der Dachneigung vor. Zwar wurden in den letzten Jahren für eine Vielzahl an Gemeinden Solarkataster angelegt, die darin erhobenen Daten sind jedoch nicht oder nur begrenzt zugänglich bzw. lassen nur

begrenzt Rückschlüsse zur Dachneigung und Ausrichtung zu. Vorausgehende Arbeiten zu Solarpotenzialen unterlagen vergleichbaren Datenlücken. Für die Berechnung des solarenergetischen Potenzials mussten daher Annahmen zur Dachneigung getroffen werden. Diverse Untersuchungen gehen davon aus, dass die Mehrheit der Gebäude mit einem Steildach eine Neigung zwischen 20° und 50° besitzt. Kaltschmitt und Wiese gingen 1993 von einer mittleren Dachneigung von 32° bei Einfamilienhäusern und von 42° bei Mehrfamilienhäusern aus. Weitere Untersuchungen hingegen gehen von einer mittleren Dachneigung von 30° bzw. 35° (Scheffler, J. 2002, S. 65, ARGE Solarkataster Bamberg 2011, S. 124 & 126, Braun, M. *et al.* 2012) für alle Gebäude aus. Dies deckt sich etwa mit der ermittelten durchschnittlichen Neigung von etwa 36° Grad für Baden-Württemberg (Lüth, J. K. 2017). Aufgrund der geringen verfügbaren Datenlage wurde sich für die weiteren Berechnungen an die Annahmen von Kaltschmitt, M. & Wiese, A. (1993) angelehnt. D. h., dass für Wohngebäude mit 1-2 Wohnungen eine Dachneigung von 35° Grad und für Wohngebäude mit 3 und mehr Wohnungen eine Dachneigung von 45° Grad angenommen wird (Tab. 40).

Tab. 40: Annahmen zur Neigung von Satteldächern differenziert nach Anzahl der Wohnungen in Wohngebäuden

Wohngebäude mit 1-2 Wohnungen (EZH)	Wohngebäude mit 3 und mehr Wohnungen (KMH, MMH, GMH)
in °Grad	in °Grad
35	45

Spezifische Heizenergiekennwerte und Heizungsanlagen

Für die Berechnung der spezifischen Heizenergiekennwerte wird das in Abschnitt 4.1.2 beschriebene Verfahren angewendet. Darüber hinaus werden Informationen zu den vorrangig verwendeten Wärmeerzeugungssystemen herangezogen. Wie in Tab. 41 aufgeführt, überwiegt in Landau (Fallbeispiel) der Anteil (rund 60 %) der mit Gas betriebenen Heizungsanlagen. Heizöl folgt mit rund 30 % und dann Fern-/Nahwärme mit etwas mehr als 10 %.

Tab. 41: Struktur der Heizungsanlagen und Wärmeversorgung im Fallbeispiel

Gemeinde / Region	Aufteilung Fernwärme, Gas und Heizöl		
	Heizöl	Gas	Fernwärme
Landau	29%	58%	12%
Germersheim	55%	42%	4%
Südliche Weinstraße	55%	42%	4%
Südwestpfalz	55%	42%	4%
Gesamte Südpfalz	52%	43%	5%

Wie in Abschnitt 4.1.2 beschrieben wird für die Berechnung des Nutzenergiebedarfs aus der Aufteilung der Wärmeträger und den jeweiligen Anlagennutzungsgraden ein gewichteter Jahresnutzungsgrad ermittelt. Für das vorliegende Fallbeispiel wurde dahingehend ein gewichteter Jahresnutzungsgrad von 87 % ermittelt.

6.1.2 Einwohner- und Haushaltsdaten

Einwohner- und Haushaltsdaten bilden eine zentrale Ausgangslage für die Berechnung der Energieverbräuche im Modell. Wie in Kapitel 4.2 und 4.3 aufgezeigt wurde, hat die Haushaltsgröße erheblichen Einfluss auf den Energiebedarf. Daher werden für die Berechnungen der Energiebedarfe im Wohngebäudebestand, Wohnungs- und Gebäudebelegungskennziffern ermittelt. Die hierzu benötigten Daten zum Fallbeispiel wurden dem Zensus 2011 entnommen. Aufgrund des Datenschutzes gehen aus den Daten der Zensus-Online-Datenbank und den darin bereitgestellten Daten zum Fallbeispiel unterschiedliche Angaben zu den im Fallbeispiel wohnenden Personen, der Anzahl der Haushalte und bewohnten Wohnungen hervor (Tab. 42).

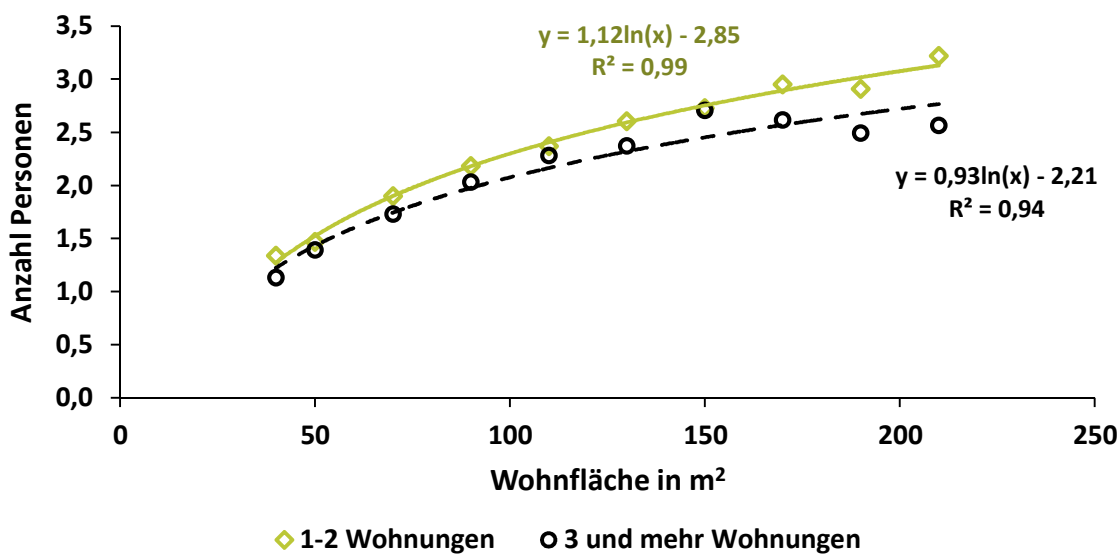
Tab. 42: Haushalte, Haushaltsgrößen, Einwohner und bewohnte Wohnungen nach Größe der privaten Haushalte

	Größe des privaten Haushalts						
	Insgesamt	1	2	3	4	5	6 und mehr
Anzahl Haushalte ¹	20.716	8.183	6.820	2.849	2.001	592	271
Anzahl Personen	42.422	7.906	13.487	8.388	7.876	2.925	1.840
Personen je Haushalt	2,05	0,97	1,98	2,94	3,94	4,94	6,78
Anzahl Personen (berechnet) ²	43.171	8.183	13.640	8.547	8.004	2.960	1.837
Wohnungen (ohne Wohnheime)	19.297	7.380	6.474	2.692	1.919	570	262
Anzahl Personen (berechnet) ³	40.712	7.380	12.948	8.076	7.676	2.850	1.782

Wie Tab. 42 zeigt, weicht die berechnete Anzahl der Personen die in den Haushaltsgrößen-Klassen ausgewiesen wird von der zu erwartenden Anzahl Personen je Haushaltsgrößen-Klasse ab (vergleiche Zeile 3 in Tab. 42). D. h., dass in einem 1-Personen-Haushalt laut Zensus 2011 0,97 Personen vorkommen. Dies setzt sich bis zu den 5-Personen-Haushalten fort. Des Weiteren sind im Fallbeispiel laut Online-Datenbank 20.716 Haushalte wohnhaft. Vergleicht man dies mit den Angaben zu den Wohnungen (ohne Wohnungen in Wohnheimen) und den zugeordneten privaten Haushalten zeigt sich eine Summe von 19.297 Haushalten. Dem stehen jedoch 20.896 (Zensus 2011) bewohnte Wohneinheiten gegenüber. Die Unterschiede ergeben sich laut DESTATIS aus

Datenschutzgründen. Um den Einfluss der unterschiedlichen Angaben auf die Belegungskennziffern zu ermitteln, wurden zwei Rechenwege angewendet.

Zunächst werden aus den verfügbaren Daten die durchschnittlichen Haushaltsgrößen für die Gebäudeklassen „Wohngebäude mit 1 und 2 Wohnungen“ und „Wohngebäude mit 3 und mehr Wohnungen“ differenziert nach der Wohnungsgröße (20 m²-Intervallen) ermittelt²¹. Hierauf aufbauend lassen sich für die beiden Klassen „Wohngebäude mit 1 und 2 Wohnungen“ und „Wohngebäude mit 3 und mehr Wohnungen“ jeweils separate Funktionen ableiten. Mit deren Hilfe kann anschließend die Anzahl der Personen in Abhängigkeit der Wohnfläche bestimmt werden (Abb. 50).



Grafik: Norbert Krauß

Daten: Statistische Ämter des Bundes und der Länder, 2014

Abb. 50: Anzahl der Personen in Wohngebäuden mit 1 und 2 Wohnungen und 3 und mehr Wohnungen in Abhängigkeit der Wohnfläche

Die Unterschiede zwischen den Funktionen fallen bei einer Wohnfläche von 50 m² gering aus, nehmen jedoch mit steigender Wohnfläche zu (Abb. 50). Unklar an dieser Stelle ist, wie stark die Werte und damit die Funktion durch das Geheimhaltungsverfahren beeinflusst werden. Anhand der abgeleiteten Funktionen können abschließend die Anzahl an Personen für die in Kapitel 6.1.1, Tab. 36 ermittelten Wohnflächen der Wohnungen und Wohngebäude berechnet werden.

Im zweiten Ansatz wird für die Wohngebäudeklassen (Gebäude nach Anzahl der Wohnungen) die mittlere Anzahl an Personen je Wohnung bestimmt (Tab. 43). Diese wiederum können den Gebäudevertretern gemäß der Anzahl an Wohnungen zugeordnet werden (Tab. 44).

²¹ Für die Berechnung wurden die mittleren Flächen der 20 m²-Intervalle verwendet. D. h., Wohnungen mit 60-79 m² wurden mit 69,5 m² angesetzt.

Tab. 43: Verteilung der Haushaltsgößen auf die Wohnungen differenziert nach Gebäudegröße und daraus abgeleitete mittlere Belegung

Anzahl der Wohnungen in Gebäude mit	Anzahl Personen						Mittlere Belegung
	1	2	3	4	5	6*	
1 Wohnung	1.288	2.461	1.267	1.139	329	160	2,61
2 Wohnungen	714	675	248	148	51	22	2,05
1 und 2 Wohnungen	2.002	3.136	1.515	1.287	380	182	2,49
3 - 6 Wohnungen	2.198	1.673	642	332	94	45	1,92
7 - 12 Wohnungen	1.717	1.147	384	239	84	31	1,88
13 und mehr Wohnungen	1.463	518	151	61	12	4	1,49

*Für die Berechnungen wurde eine mittlere Anzahl von 6,8 Personen angesetzt.

Werden die Wohnungsbelegungskennwerte aus beiden Ansätzen gegenübergestellt, zeigen sich nur geringfügige Unterschiede. Eine Ausnahme bilden hierbei Wohngebäude mit 13 und mehr Wohnungen. Welche Ursachen für die Unterschiede verantwortlich sind (abgesehen vom Datenschutz), kann nicht abschließend geklärt werden. Für das weitere Vorgehen wird für die Gebäudevertreter jeweils die mittlere Wohnungsbelegung berechnet (Tab. 44). Dies bildet die Grundlage für die weiteren Berechnungen.

Tab. 44: Gegenüberstellung der Wohnungsbelegung mit Ansatz 1 und Ansatz 2

Wohngebäude mit	Wohnungsbelegung (Anzahl Personen je Wohnung)		
	1. Ansatz	2. Ansatz	Mittelwert
1-2 Wohnungen (EZH)	2,53	2,49	2,51
3-6 Wohnungen (KMH)	1,89	1,92	1,91
7-12 Wohnungen (MMH)	1,84	1,88	1,86
13 und mehr Wohnungen (GMH)	1,69	1,49	1,59

Gebäudevertreter

Gemäß den Berechnungsansätzen in Kapitel 3 und den in den Kapiteln 6.1.1 und 6.1.2 angeführten fallstudienspezifischen Eingangsdaten sowie Annahmen wurden die in Tab. 45 und Tab. 46 ermittelten Kennwerte der Gebäudevertreter zusammengefasst.

Tab. 45: Kennwerte der Gebäudevertreter (Eigene Berechnungen)

Kennwerte	1 und 2 Wohnungen		3 bis 6 Wohnungen		7 bis 12 Wohnungen		13 und mehr Wohnungen	
	frei- ste- hend	gereiht	frei- ste- hend	gereiht	frei- ste- hend	gereiht	frei- ste- hend	gereiht
Anzahl Wohnungen je Wohngebäude	1,2	1,1	4,0	4,0	7,9	8,6	21,6	20,5
Wohnfläche je Wohngebäude in m ²	148,1	125,0	329,7	324,5	622,7	671,4	1.650,4	1.265,1
Wohnfläche je Woh- nung in m ²	129,6	113,2	83,1	81,1	79,0	77,6	76,6	61,7
Geschossfläche je Wohngebäude in m ²	192,5	163,3	428,6	421,9	809,5	872,8	2.145,5	1.644,6
Länge Firstseite / Giebelseite	10	10	12	12	15	15	20	20
Anzahl Vollgeschos- se V1	1	1	2	2	3	3	4	4
Anzahl Vollgeschos- se V2	2	2	3	3	4	4	5	5
Dachneigung V1	FD	FD	FD	FD	FD	FD	FD	FD
Dachneigung V2	35	35	45	45	45	45	45	45
Anteil Dachneigung 1	10	10	20	20	20	20	20	20
Anteil Dachneigung 2	90	90	80	80	80	80	80	80
Haushaltsgröße (An- zahl Personen) je WE	2,6	2,4	1,9	1,9	1,9	1,8	1,8	1,6
Anzahl Personen je Wohngebäude	3,0	2,7	7,7	7,6	14,7	16,0	39,4	32,3

Tab. 46: Dachfläche und bebaute Fläche der Gebäudevertreter

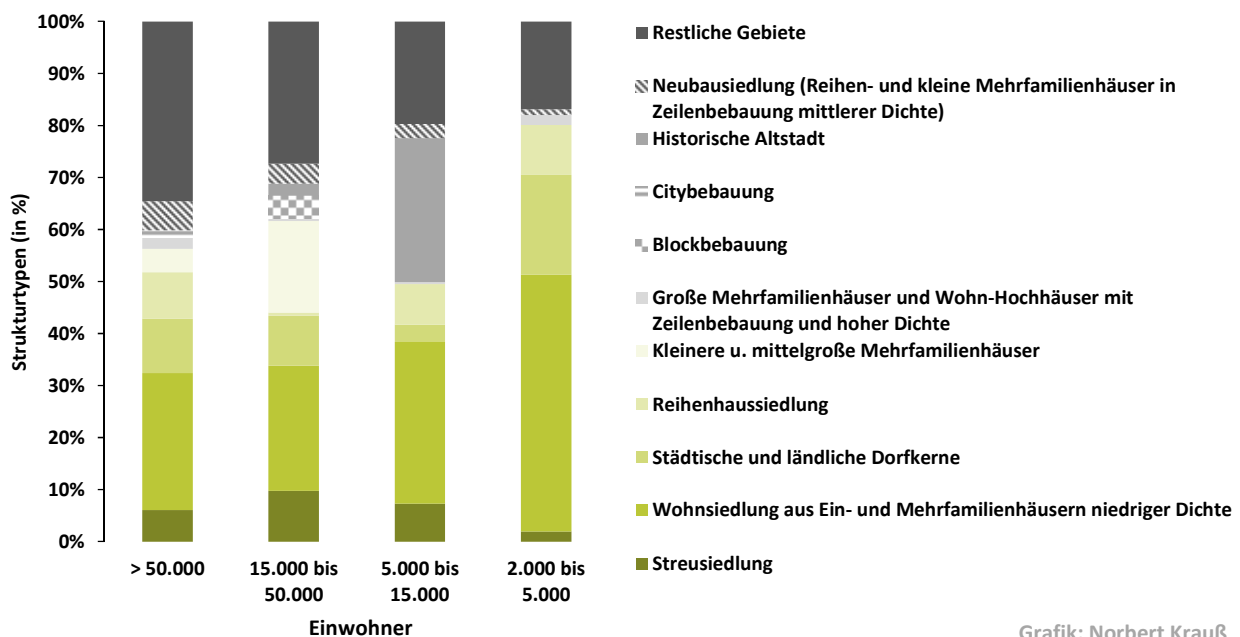
Gebäudevertreter Code	Dachfläche in m ²	Bebaute Fläche in m ²
EZH_F_1_10_00	192,5	192,5
EZH_F_1_10_35	174,9	143,3
EZH_F_2_10_00	96,2	96,2
EZH_F_2_10_35	100,3	82,1
DH/RH_G_2_10_00	81,2	81,2
DH/RH_G_1_10_35	147,7	121,0
DH/RH_G_2_10_35	84,7	69,3
KMH_F_3_12_45	167,6	118,5
KMH_F_3_12_00	142,9	142,9
KMH_G_3_12_45	165,0	116,6
KMH_G_3_12_00	140,6	140,6
MMH_F_4_15_45	243,9	172,5
MMH_F_4_15_00	202,4	202,4
MMH_G_4_15_45	263,0	186,0
MMH_G_4_15_00	218,2	218,2
GMH_F_4_20_45	636,1	449,8
GMH_F_5_20_00	429,1	429,1
GMH_G_4_20_45	487,6	344,8
GMH_G_5_20_00	328,9	328,9

6.1.3 Eingangsdaten und Annahmen zu den Strukturtypen

Nachdem zuvor Eingangsdaten und Annahmen zur Wohnbebauung und der Bewohner/innenstruktur dargelegt wurden, werden nachfolgend für die Strukturtypen die Eingangsdaten und Annahmen vorgestellt.

Anteile der einzelnen Strukturtypen an der Wohnbebauung

Die Wohnbebauung einer Siedlung teilt sich auf unterschiedliche Bebauungs- und Strukturtypen auf (vgl. Kapitel 3.1). Dabei variiert die Bedeutung (Nettowohnbauland oder Gebäudeanzahl) der Strukturtypen von Siedlung zu Siedlung (Abb. 51). Während z. B. in kleineren Gemeinden mit 2.000 bis 5.000 Einwohner/innen vor allem Wohnsiedlungen mit geringer Dichte, Dorfkerne und Reihenhaussiedlungen bis zu 75 % ausmachen können, beträgt der Anteil dieser Strukturtypen in Gemeinden mit mehr als 50.000 Einwohner/innen nur noch etwa 45 % (Abb. 51). Abb. 51 zeigt weiterhin, dass nicht jeder Strukturtyp (z. B. die Citybebauung) in allen Gemeinden vertreten ist.



Grafik: Norbert Krauß
Daten: Blesl et al. (2008)

Abb. 51: Aufteilung der Siedlungsfläche in Strukturtypen nach Einwohnerzahl

Für die spätere Berechnung der regenerativen Energiepotenziale in der Fallstudie ist es notwendig, die Wohngebiete den einzelnen Strukturtypen zuzuordnen. Zunächst werden Informationen zur Flächen-Relevanz der einzelnen Strukturtypen innerhalb des Untersuchungsgebietes benötigt. D. h., wie häufig kommen die einzelnen Strukturtypen im Untersuchungsgebiet vor bzw. wieviel Fläche des Untersuchungsgebietes entspricht den einzelnen Strukturtypen?

Informationen zur Häufigkeit bzw. Flächen-Relevanz der einzelnen Strukturtypen liegen jedoch nur in Ausnahmefällen in der benötigten Detailschärfe vor. Orientierung können z. B. Untersuchung von Blesl, M. *et al.* (2008), Gerstenberg, J. H. *et al.* (2010), IBA Hamburg (2010), Coenradie, B. & Haag, L. (2012), Gerstenberg, J. H. *et al.* (2016) und Genske *et al.* 2011 liefern. Die Auswertung mehrerer Studien, Flächennutzungsplänen und Stadtentwicklungskonzepten zeigen selbst bei Gemeinden mit vergleichbaren Einwohnerzahlen erhebliche Unterschiede in der Häufigkeit bzw. Flächen-Relevanz in der Struktur der Wohnbebauung. Daher müssen Informationen zur Häufigkeit bzw. Flächen-Relevanz durch alternative Daten (iterativ) abgeleitet und durch Annahmen ergänzt werden. Eine Übertragung der Datenlage von Großstädten auf Gemeinden mit 100 Tsd. und weniger Einwohner/innen kann nur unzureichend der lokalen Situation dieser Gemeinden entsprechen.

Diese können jedoch aus verschiedenen zugrunde liegenden Informationen und durch Annahmen ergänzt und abgeleitet werden. Eine erste Orientierung liefert die Auswertung statistischer Daten zum Wohngebäudebestand. So können der Datenbank des statisti-

schen Bundesamtes²² (unter) Informationen zum Wohngebäudebestand für den Stichtag 9. Mai 2011 entnommen werden. Die Datenbank ermöglicht es, die zugrunde liegenden Wohngebäude zum einen nach der Anzahl der Wohneinheiten zu gliedern und zum anderen nach der Bauweise zu unterteilen. Mit Hilfe dieser Aufgliederung des Wohngebäudebestands können erste Aussagen zur mengenmäßigen Bedeutung einzelner Gebäudetypen und daraus abgeleitet Angaben zu einzelnen Vertretern der Strukturtypen getroffen werden.

Dies betrifft insbesondere die Strukturtypen

- Freistehende Ein- und Zweifamilienhäuser
- Ein- und Zweifamilienhäuser in Reihe
- Und Mehrfamilienhäuser in Zeilenbauweise

Damit kann bereits ein Teil der Wohnbebauung und Wohngebiete einer Gemeinde abgedeckt werden. In Gemeinden mit 20 bis 50 Tausend Einwohner/innen dominieren i. d. R. die freistehenden Ein- und Zweifamilienhäuser sowie die Ein- und Zweifamilienhäuser in Reihe.

Eine Aufteilung der Siedlungsfläche bzw. der Wohnbebauung in Strukturtypen hat den Vorteil, dass den Wohn- bzw. Bebauungsgebieten innerhalb einer Bandbreite bestimmte Charakteristika zugeordnet werden können. Hierzu gehören z. B. die Geschossigkeit, der Anteil von Frei- und Grünflächen und die bauliche Dichte der Bebauung (vgl. Kapitel 3.1). Infolgedessen können einem Gebäudetyp, aufgrund der Zuordnung zu einem Strukturtyp, gewisse Charakteristika unterstellt werden. D. h., dass ein Wohngebäude des Typs Ein- und Zweifamilienhaus das dem Strukturtyp „lockere Bebauung mit Ein-/Zweifamilienhäusern“ zugeordnet wurde, im Durchschnitt eine geringere Anzahl an Geschossen, einen höheren Anteil an Frei- und Grünfläche und eine geringere bauliche Dichte besitzt als derselbe Gebäudetyp im Strukturtyp „Reihenhausbebauung“. Mittels der Strukturtypenmethode können somit Annahmen zu fehlenden Merkmalen, z. B. zur Geschossigkeit, der Frei- und Grünflächenanteile und der baulichen Dichte (hier Geschossflächenzahl), getroffen werden. Hierzu kann auf die in Kapitel 3.1 dargelegten Resultate aus der Literaturrecherche sowie eigenen Analysen zurückgegriffen werden.

Die Aufteilung des Wohngebäudebestands im Fallbeispiel stützt sich auf bereits bestehende Untersuchungen aus dem Projekt EASE. Diese liefern eine erste Grundlage. Zusammen mit den Zensusdaten und einem iterativen Prozess wurden dahingehend die Wohngebäude, wie in der Tab. 47 dargelegt, auf die im Modell verwendeten Strukturtypen aufgeteilt.

²² www.zensus2011.de

Tab. 47: Aufteilung der Gebäudevertreter auf die Strukturtypen

Strukturtyp	EZH		KMH		MMH		GMH	
	F	G	F	G	F	G	F	G
Freistehende Ein- und Zweifamilienhäuser	100	0	0	0	0	0	0	0
Ein- und Zweifamilienhäuser als Doppel- und Reihenhäuser	0	100	0	0	0	0	0	0
Mehrfamilienhäuser in Zeilenstruktur	0	0	0	40	0	30	0	30
Geschosswohnungsbau in offener Baustruktur	0	0	30	0	30	0	40	0
Mehrfamilienhäuser in verdichteten Blockstrukturen	0	0	0	40	0	40	0	40
Mehrfamilienhäuser in aufgelockerte Blockstrukturen	0	0	70	20	70	30	60	30

Geschossflächendichte

Die Geschossflächendichte ist eine zentrale Berechnungsgrundlage für die Ableitung der Flächenkennwerte. Informationen zur Geschossflächendichte für das Fallstudiengebiet liegen punktuell aus diversen Quellen vor. Hierzu gehören z. B. Untersuchungen, die im Rahmen des Projektes EASE durchgeführt wurden. So wurde im Fallbeispiel anhand von Laserscannerdaten und digitalem Kartenmaterial der Gebäudebestand kartiert. Hierbei handelt es sich um zwei Gebiete mit mehrheitlich freistehenden Ein- und Zweifamilienhäusern sowie um zwei weitere Gebiete mit Mehrfamilienhäusern in lockerer Blockbebauung (Krauß, N. 2013). Darüber hinaus wird auf die Analysen in Kapitel 3.1.2 und Daten aus der bestehenden Literatur zurückgegriffen.

Tab. 48: Geschossflächendichte differenziert nach Strukturtypen und Wohngebäudetyp

Strukturtyp	EZH		KMH		MMH		GMH	
	f	g	f	g	f	g	f	g
Freistehende Ein- und Zweifamilienhäuser	0,3							
Ein- und Zweifamilienhäuser als Doppel- und Reihenhäuser	0,5							
Mehrfamilienhäuser in Zeilenstruktur			0,6	0,6	0,9	0,9	1,2	1,2
Geschosswohnungsbau in offener Baustruktur			0,4	0,4	0,7	0,7	1,0	1,0
Mehrfamilienhäuser in verdichteten Blockstrukturen			1,0	1,0	1,5	1,5	2,0	2,0
Mehrfamilienhäuser in aufgelockerte Blockstrukturen			0,8	0,8	1,2	1,2	1,6	1,6

Wie bereits in Kapitel 3.1.2, Tab. 5 angeführt, können Gemeinden aufgrund der Bevölkerungsdichte und Bevölkerungsanzahl Bandbreiten der Geschossflächendichte zugeordnet werden. Auf Basis der angeführten Daten wurden Annahmen zu den Geschossflächendichten in den jeweiligen Strukturtypen und den zugeordneten Wohngebäuden getroffen (Tab. 48).

6.1.4 Eingangsdaten regenerativer Energien

Neben Daten und Kennwerten zum Gebäudebestand, den Strukturtypen und der Bewohnerschaft werden für die Berechnung der regenerativen Energiepotenziale Daten u. a. zum Bioabfall- und Hausmüllaufkommen sowie klimatische Daten (Globalstrahlung, Lufttemperatur) benötigt. Wo keine lokal spezifischen Daten zur Verfügung stehen, wird auf Literaturkennwerte zurückgegriffen.

Biomasse

Für die Berechnung des energetischen Biomassepotenzials werden Informationen zum Bioabfall- und Hausmüllaufkommen im Fallbeispiel benötigt. Entsprechende Informationen können der amtlichen Regionalstatistik oder dem lokalen Entsorgungsträger entnommen werden. Für das Fallbeispiel liegen folgende Bioabfall- und Hausmüllaufkommen für das Jahr 2011 vor (STALA RLP 2013, EWL 2016):

Art des Abfalls	Menge in t ¹	Menge in t ²
Bioabfall	4.379	4.394
Hausmüll	6.615	6.634

¹ STALA RLP (2013)
² EWL (2016)

Bei 43.935 Einwohnern sind dies je Einwohner 99,7 kg Bioabfall und 150,6 kg Haus- und Sperrmüll. Für die Berechnung der Nahrungsmittelabfälle im Hausmüll wird zunächst der Anteil des Sperrmülls abgezogen, da es sonst zu einer Überschätzung kommt. Im Abfallwirtschaftskonzept des EWL (2016; S. 36) wird der Anteil des Sperrmülls mit rund 26 % ausgewiesen. Der Anteil des Sperrmüllaufkommens am Haus- und Sperrmüllaufkommen bewegt sich seit 2009 bis 2015 zwischen 22 % und 28 % auf vergleichbarem Niveau. In den Jahren 2006 bis 2008 lag es im Durchschnitt bei etwa 17 % (EWL 2016; S. 36). Für das Jahr 2011 ergibt sich hieraus ein Rest- bzw. Hausmüllaufkommen in Höhe von 112 kg je Einwohner.

Ebenfalls im Abfallwirtschaftskonzept angegeben ist der Anschlussgrad im Holsystem an die Biotonne. Diese ist im Zeitraum 2010 bis 2015 von 72 % auf 77 % angestiegen (EWL 2016; S. 16). Dies entspricht etwa einem jährlichen Anstieg des Anschlussgrads um 1 %.

Aufgrund dessen wird für die weitere Berechnung von einem mittleren Anschlussgrad von 73 % für 2011 ausgegangen.

Solarenergie (PV und Solarthermie)

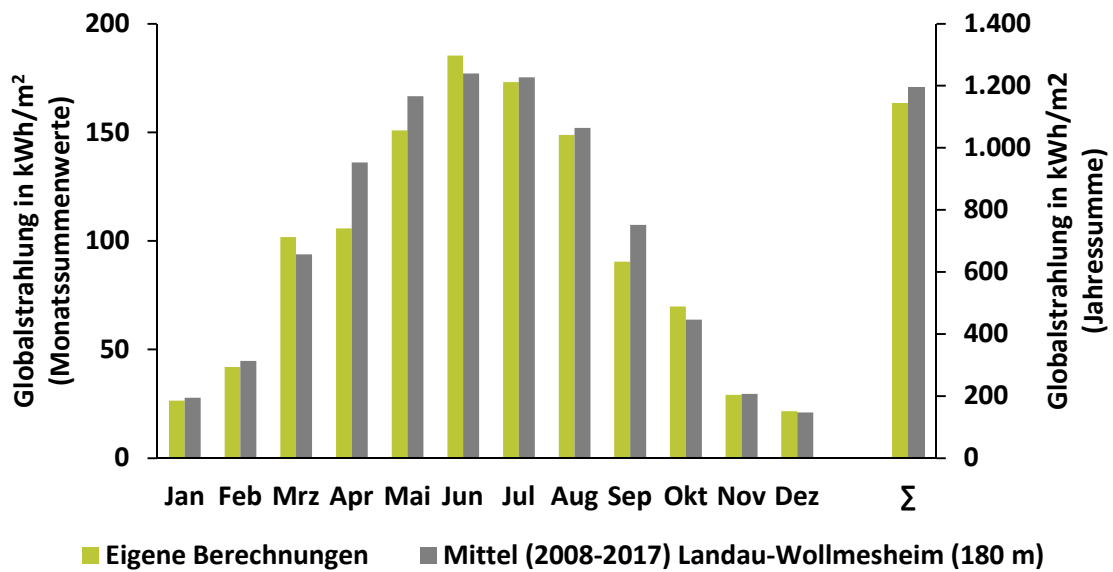
Für die Berechnungen der solaren Energiepotenziale wurden die Daten der Testreferenzjahre aus CEC & DWD (2011) herangezogen und auf das Fallbeispiel angewendet. Mit Hilfe des, dem Datensatz beigefügten Tool, wurde der Stadteffekt berücksichtigt. Hierzu wurden die Bevölkerungsanzahl von 43.935 und die Höhe über Normalhöhennull von 142 Meter angesetzt.

Weiterhin werden für die Berechnung die in Kapitel 6.1.1 dargelegten prozentualen Dachausrichtungen und deren Neigung zugrunde gelegt (vgl. Abb. 48, Tab. 39, Tab. 40). Die ermittelten Globalstrahlungswerte für das Fallbeispiel können der Tab. 49 entnommen werden.

*Tab. 49: Globalstrahlung (in kWh/m²*a) in Abhängigkeit von Ausrichtung und Dachneigung für das Fallbeispiel*

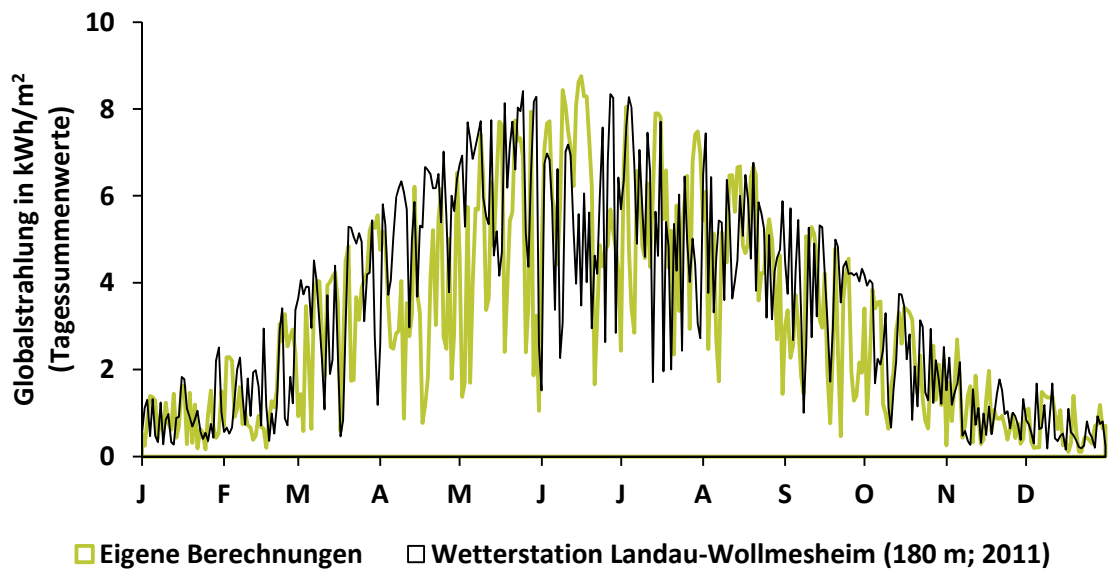
Dachneigung (in Grad)	Ausrichtung der Dachfläche		
	Osten (90°)	Süden (180°)	Westen (270°)
55°	1.047	1.190	801
45°	1.106	1.240	869
35°	1.153	1.264	936
25°	1.183	1.262	1.000

Nachfolgend sind beispielhaft der mittlere Jahresgang der solaren Globalstrahlung in täglicher (Abb. 52) und monatsweiser (Abb. 53) Auflösung für das Fallbeispiel dargestellt. Zum Vergleich wurden die ermittelte Globalstrahlung mit den Messtationen Landau-Wollmesheim und Landau-Nussdorf verglichen. Für die Monatswerte wurde die mittlere Globalstrahlung der Jahre 2008 bis 2017 herangezogen (Abb. 52). Es zeigt sich, dass eine gute Übereinstimmung bei den einzelnen Monaten vorliegt. Lediglich die Monate April und September weichen mit 22 % und 16 % etwas stärker ab. Über das gesamte Jahr betrachtet liegt die Summe der eigenen Berechnungen mit 1.145 kWh/m² rund 4 % höher als die Jahressumme von 1.196 kWh/m² der Messstation.



Grafik: Norbert Krauß
 Quelle: Eigene Berechnungen & Wetter-Portal Rheinland-Pfalz - Agrarmeteorologie RLP

Abb. 52: Globalstrahlung (Monatssummenwerte und Jahressumme in kWh/m²) auf horizontaler Ebene für das Fallbeispiel



Grafik: Norbert Krauß
 Quelle: Eigene Berechnungen & Wetter-Portal Rheinland-Pfalz - Agrarmeteorologie RLP

Abb. 53: Globalstrahlung (Tagessummenwerte in kWh/m²) auf horizontaler Ebene für das Fallbeispiel

6.1.5 Ergebnisse des Siedlungsmodells

Auf Basis der zuvor dargelegten Eingangsdaten und Setzungen ergeben sich die nachfolgend vorgestellten Ergebnisse des Siedlungsmodells für die Fallstudie. Die in der Tab. 50 zusammengefassten Daten geben einen Überblick zu den Merkmalen Einwohner/innendichte, prozentuale Flächenanteile der Strukturtypen, Geschossflächen- und Grundflächendichte, durchschnittliche Geschossigkeit sowie durchschnittliche Grundstücksgröße je Strukturtyp in den Wohnbauflächen im Untersuchungsgebiet.

Tab. 50: Ausgewählte Ergebnisse aus dem Siedlungsmodell

Strukturtyp	Bevölkerungsdichte je NWBL (EW/ha)	Flächenanteil Strukturtyp (%)	Geschossflächen-dichte (-)	Grundflächendichte (-)	Mittlere Geschossigkeit (Anzahl Etagen)	Mittlere Grundstücksfläche (m ²)
Freistehende Ein- und Zweifamilienhäuser	44	54	0,30	0,17	1,8	642
Ein- und Zweifamilienhäuser als Doppel- und Reihenhäuser	101	17	0,60	0,24	2,5	271
Mehrfamilienhäuser in Zeilenstruktur	133	7	0,72	0,22	3,3	811
Geschosswohnungsbau in offener Baustruktur	81	5	0,47	0,14	3,3	1317
Mehrfamilienhäuser in verdichteter Blockstruktur	202	5	1,10	0,33	3,4	566
Mehrfamilienhäuser in aufgelockerter Blockstruktur	131	12	0,73	0,22	3,3	846

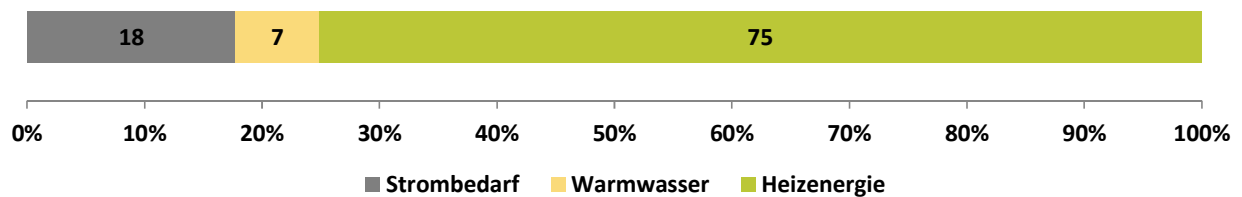
6.2 Energiebedarf im Fallbeispiel

Nachdem zuvor die Eingangsdaten und Annahmen zur Berechnung des Energiebedarfs und der regenerativen Energiepotenziale des Fallbeispiels dargelegt wurden, werden im nachfolgenden Abschnitt die daraus berechneten Energiebedarfe dargelegt. Die Ergebnisse der Berechnungen werden jeweils differenziert nach Strukturtyp und Anwendungsbereich sowie für das Fallbeispiel insgesamt vorgestellt. Zur Einordnung der berechneten Energiebedarfe werden darüber hinaus spezifische Kennwerte ausgewiesen, die mit Literaturwerten verglichen werden. Weiterhin werden auch die Ergebnisse der stündlichen Berechnungen dargelegt. Hierzu wurden, zur besseren Übersichtlichkeit, Referenzzeiträume ausgewählt, die eine Kalenderwoche mit sieben Tage bzw. 168 Stunden umfasst. Für die Referenzzeiträume wurde jeweils eine Kalenderwoche aus der Winter-, Sommer- und der Übergangssaison, was Frühling bzw. Herbst widerspiegelt, ausgewählt. Durch die Betrachtung der drei Untersuchungszeiträume wurden den unterschiedlichen Witte-

rungsverhältnissen im Jahresverlauf Rechnung getragen. Nachfolgend werden die Berechnungsergebnisse der Jahresbilanz und die Ergebnisse der Lastmodellierung präsentiert.

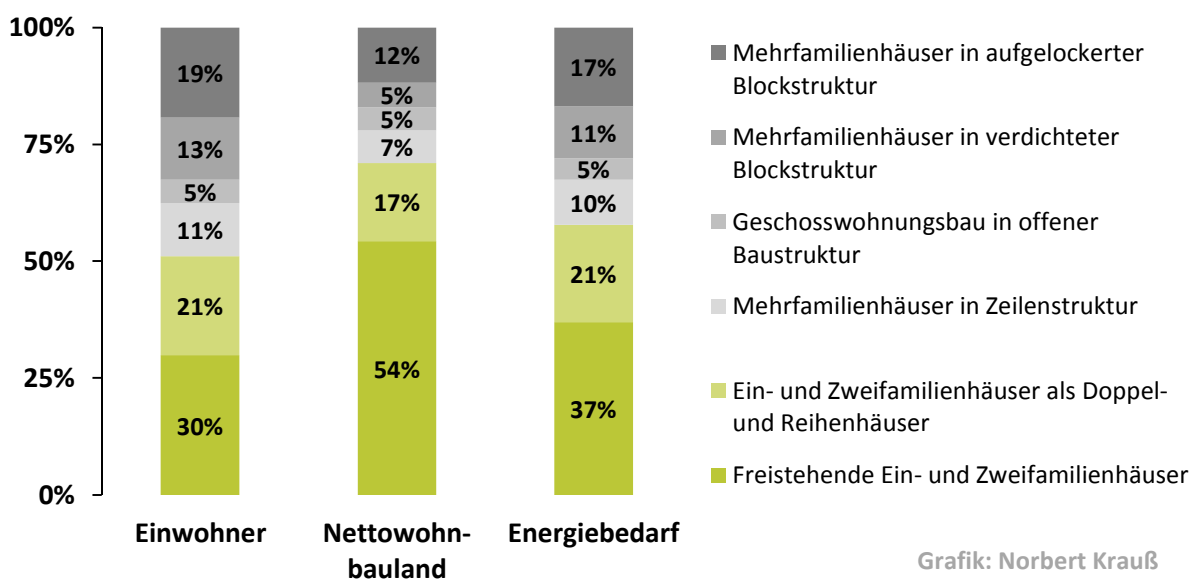
6.2.1 Gesamtbilanz

Die auf den zugrunde liegenden Eingangsdaten und Parametern beruhenden Berechnungen ergeben für das Fallbeispiel einen Nutzenergiebedarf von 342.732 MWh (Tab. 51). Rund 75 % davon entfallen auf Heizwärme, 18 % auf Strom und 7 % auf die Bereitstellung von Warmwasser (Abb. 54). Dabei entfällt rund 58 % des Energiebedarfs auf die Strukturtypen der Ein- und Zweifamilienhausbebauung (Abb. 55) und die verbleibenden 42 % auf den Bestand der Mehrfamilienhäuser. Der Bestand der Ein- und Zweifamilienhäuser macht weiterhin rund 70 % des Nettowohnbaulands und etwa die Hälfte der Einwohner aus. Im Vergleich hierzu beträgt der Energiebedarf der Strukturtypen mit Mehrfamilienhausbebauung rund 42 %, der Anteil des Nettowohnbaulands rund 30 % und der Anteil der darin lebenden Einwohner rund die Hälfte der Bevölkerung aus (Abb. 55; Tab. 51).



Grafik: Norbert Krauß

Abb. 54: Struktur des Nutzenergiebedarfs



Grafik: Norbert Krauß

Abb. 55: Aufteilung von Einwohner, Nettowohnbauland und Energiebedarf auf die Strukturtypen

Für eine erste Gegenüberstellung des Energiebedarfs mit dem Potenzial der regenerativen Energien müssen zunächst einige Annahmen getroffen werden. So kann Strom aus Photovoltaikanlagen zur Deckung des Haushaltsstrombedarfs und darüber hinaus auch zur Bereitstellung von Raumwärme und Warmwasser genutzt. Solarthermie wiederum wird ausschließlich für die Bereitstellung von Raumwärme und Warmwasser genutzt. Für die energetische Nutzung organischer Abfälle wurden theoretische Energiegehalte je organischer Abfallfraktion zugrunde gelegt. Für die nachfolgend dargelegten Resultate wurde die energetische Nutzung organischer Abfallstoffe mittels BHKW und Nah- bzw. Fernwärmenetz zugrunde gelegt.

Tab. 51: Energiebedarfe (Strom, Warmwasserbereitung, Heizwärme) und spezifische Kennwerte der Strukturtypen im Fallbeispiel

Kennwert (Einheit)	Freistehende Ein- und Zweifamilienhäuser				MFH in Zeilenstruktur	MFH in offener lockerer Baustruktur	MFH in verdichteter Blockstruktur	MFH in aufgelockerter Blockstruktur	Insgesamt
	Einwohner	Doppel- und Reihenhäuser	MFH in Zeilenstruktur	MFH in offener lockerer Baustruktur					
Einwohner	(Anzahl)	13.144	9.285	5.038	2.193	5.839	8.454	43.954	
Nettowohnbauland	(ha)	297	92	38	27	29	64	547	
Einwohner je NWBL	(EW/ha)	44	101	133	81	202	131	80	
Strombedarf		17.340	12.249	7.321	3.201	8.505	12.308	60.923	
Warmwasser		6.877	4.858	2.919	1.280	3.396	4.913	24.242	
Heizenergie	(MWh/a)	105.311	48.505	28.593	12.750	32.903	47.995	276.058	
Energiebedarf		129.528	65.611	38.832	17.232	44.804	65.215	361.223	
Strombedarf		13,39	18,67	18,85	18,58	18,98	18,87	16,87	
Warmwasser	(%)	5,31	7,40	7,52	7,43	7,58	7,53	6,71	
Heizenergie		81,30	73,93	73,63	73,99	73,44	73,59	76,42	
Strombedarf je EW		1,32	1,32	1,45	1,46	1,46	1,46	1,39	
Warmwasser je EW	(MWh/EW*a)	0,52	0,52	0,58	0,58	0,58	0,58	0,55	
Heizenergie je EW		8,01	5,22	5,68	5,81	5,64	5,68	6,28	
Energiebedarf je EW		9,85	7,07	7,71	7,86	7,67	7,71	8,22	
Strombedarf je NWBL		58,42	133,78	192,72	118,82	294,56	190,86	111,45	
Warmwasser je NWBL		23,17	53,06	76,84	47,52	117,60	76,18	44,35	
Heizenergie je NWBL		344,43	592,78	599,21	418,22	898,47	635,26	471,01	

6.2.2 Warmwasserbedarf

Der Energiebedarf zur Bereitstellung von Warmwasser wird durch die Struktur und Anzahl der Haushalte beeinflusst. Dahingehend werden für die Berechnung Informationen zur Haushaltsgröße, der Aufteilung der Haushalte und spezifische Kennwerte zum Warmwasserverbrauch je Person bzw. je Haushalt benötigt. Die Berechnungen, erfolgen wie bei den Berechnungen zum Strombedarf, entlang der Gebäudetypen und den berechneten Haushaltsgrößen. Für den spezifischen Warmwasserbedarf werden auf die in Abschnitt 4.2.4 angeführten haushaltsgrößenabhängige Warmwasserverbräuche zurückgegriffen. Daraus ergeben sich der Energiebedarf je Haushalt, Person und Quadratmeter differenziert nach Gebäudetyp und Bauweise (Tab. 52).

Tab. 52: Bedarf an Warmwasser und Nutzenergie der Gebäudevertreter im Fallbeispiel

Gebäudetyp	Bauweise	Nutzenergiebedarf Warmwasser pro Jahr		
		kWh / HH	kWh / Per.	kWh / m ²
EZH	freistehend	1.301,0	523,2	10,0
	gereiht	1.301,0	523,2	11,5
KMH	freistehend	1.085,2	564,4	13,1
	gereiht	1.085,2	564,4	13,4
MMH	freistehend	1.069,9	570,4	13,5
	gereiht	1.069,9	570,4	13,8
GMH	freistehend	964,0	648,4	12,6
	gereiht	964,0	648,4	15,6

Der Energiebedarf je Person liegt demnach im Fallbeispiel zwischen 523,2 kWh/a und 648,4 kWh/a. Für die Strukturtypen ergeben sich die in Tab. 53 aufgeführten Bedarfe. Für das gesamte Fallbeispiel beträgt der Energiebedarf für Warmwasser 24.242 MWh/a. Der Energiebedarf teilt sich zu etwa gleichen Teilen auf den Bestand der Ein- und Zweifamilienhäuser und den Bestand der Mehrfamilienhäuser auf.

Tab. 53: Nutzenergiebedarf für Warmwasser

Strukturtypen	Nutzenergiebedarf Warmwasser	
	kWh/a	MWh/ha _{NWBL} *a
Freistehende Ein- und Zweifamilienhäuser	6.877.078	23
Ein- und Zweifamilienhäuser als Doppel- und Reihenhäuser	4.857.928	53
Mehrfamilienhäuser in Zeilenstruktur	2.918.630	77
Geschosswohnungsbau in offener Baustruktur	1.280.266	48
Mehrfamilienhäuser in verdichteter Blockstruktur	3.395.635	118
Mehrfamilienhäuser in aufgelockerter Blockstruktur	4.912.764	76
Insgesamt	24.242.300	44

6.2.3 Strombedarf

Aus den Berechnungen ergibt sich für das Fallbeispiel ein Gesamtstrombedarf von rund 61 MWh/a. Der Strombedarf teilt sich etwa je zur Hälfte auf den Bestand der Ein- und Zweifamilienhäuser und den Mehrfamilienhausbestand auf. Bezogen auf das Nettowohnbauland ergibt sich ein spezifischer Durchschnittswert von 111 MWh/ha_{NWBL}*a für das Fallbeispiel. Je nach Strukturtyp schwankt der spezifische Strombedarf zwischen 58 MWh/ha_{NWBL} (freistehende Ein- und Zweifamilienhäuser) und 295 MWh/ha_{NWBL}*a (Mehrfamilienhäuser in verdichteter Blockstruktur).

Strukturtypen	Strombedarf	
	kWh/a	MWh/ha _{NWBL} *a
Freistehende Ein- und Zweifamilienhäuser	17.339.703	58
Ein- und Zweifamilienhäuser als Doppel- und Reihenhäuser	12.248.666	134
Mehrfamilienhäuser in Zeilenstruktur	7.320.671	193
Geschosswohnungsbau in offener Baustruktur	3.201.438	119
Mehrfamilienhäuser in verdichteter Blockstruktur	8.504.828	295
Mehrfamilienhäuser in aufgelockerter Blockstruktur	12.307.788	191
Insgesamt	60.923.094	111

Aus Untersuchungen und Landesstatistiken zum Stromverbrauch liegen für das Fallbeispiel Stromverbräuche für die privaten Haushalte vor. Laut Berechnungen in TRION-climate (2012) lag der Stromverbrauch der privaten Haushalte 2010 bei 52 MWh/a. Demgegenüber kommt die Energieagentur Rheinland-Pfalz (2019) auf Basis von Landesstatistiken auf einen Stromverbrauch von 89 MWh/a für 2010. Der vergleichsweise hohe Wert der Energieagentur Rheinland-Pfalz (2019) beruht auf der Berechnung, die den landesweiten Stromverbrauch zugrunde legt und anhand der Einwohnerzahl auf die betreffende Gemeinde umgelegt und entsprechend der Sektoren aufteilt. Weiterhin wurde im Rahmen der Studie „Integriertes Klimaschutzkonzept der Stadt Landau“ (IfaS 2018) ein Stromverbrauch der privaten Haushalte in Höhe von 59 MWh/a für 2016 ermittelt. Ein Vergleich mit den eigenen Berechnungen zeigt, mit Ausnahme des ermittelten Stromverbrauchs der Energieagentur Rheinland-Pfalz (2019), eine gute Übereinstimmung.

6.2.4 Heizenergie

Beruhend auf den Eingangsdaten und Annahmen zu den Baualtersklassen, den Wohnflächen und den Energiekennwerten wurden die in Tab. 54 angeführten Energiebedarfe für Heizenergie berechnet. Daraus resultiert ein Heizenergiebedarf für das Fallbeispiel in Höhe von 257.566 MWh/a. Entgegen den Berechnungen zum Strombedarf und Energiebedarf für Warmwasser liegt der Anteil der Ein- und Zweifamilienhausbebauung leicht

über der Hälfte des Heizenergieenergiebedarfs. Weiterhin wurden aus den Daten die mittlere Energiedichte der jeweiligen Strukturtypen und des Fallbeispiels, in MWh je ha Nettowohnbauland und Jahr, ermittelt.

Tab. 54: Energiebedarf für Heizenergie im Fallbeispiel (mittleres Jahr)

Strukturtypen	Nutzenergiebedarf Heizwärme	
	kWh/a	MWh/ha _{NWBL} *a
Freistehende Ein- und Zweifamilienhäuser	102.253.058	344
Ein- und Zweifamilienhäuser als Doppel- und Reihenhäuser	54.595.772	593
Mehrfamilienhäuser in Zeilenstruktur	22.761.682	599
Geschosswohnungsbau in offener Baustruktur	11.290.221	418
Mehrfamilienhäuser in verdichteter Blockstruktur	26.036.653	898
Mehrfamilienhäuser in aufgelockerter Blockstruktur	40.628.895	635
Insgesamt	257.566.281	471

Für einen Vergleich des Heizenergiebedarfs kann auf Daten aus den Untersuchungen von Göllinger, T. *et al.* (2011), TRION-climate (2012) und IfaS (2018) zurückgegriffen werden. In den Studien wird der Energieverbrauch des Wohngebäudebestands für 2008 mit 290 GWh Heizwärme (Göllinger, T. *et al.* 2011), 2010 mit 282 GWh Endenergie (TRION-climate 2012) und für 2016 mit 427 GWh Endenergie (IfaS 2018) ausgewiesen. Damit ein Vergleich mit den beiden zuletzt genannten Studien möglich ist, wurde der berechnete Nutzenergiebedarf in Endenergie umgerechnet. Hierzu wurde der Nutzenergiebedarf mit dem Kehrwert des mittleren Jahresnutzungsgrads (1,15) multipliziert. Der Endenergiebedarf für Raumwärme liegt demnach bei 296 GWh/a.

Zum Vergleich wurden die mittleren Endenergieverbräuche für Raumwärme je Gebäude der sechs Strukturtypen den Kennwerten von Jehling, M. *et al.* (2015) gegenüber gestellt (Tab. 55). Hierzu wurden die realen Verbräuche je Gebäudetyp (Jehling *et al.* (2015); Tab.1) den eigenen Strukturtypen zugeordnet. Aus der Gegenüberstellung mit den Kennwerten geht eine hohe Übereinstimmung einher. Ausnahme bildet der Gebäudetyp „MFH“ in Jehling *et al.*, welcher mit dem Strukturtyp „Geschosswohnungsbau in offener Baustruktur“ aus der vorliegenden Untersuchung verglichen wurde.

Tab. 55: Vergleich der Berechnungsergebnisse für den Endenergiebedarf für Raumwärme mit Kennwerten aus Jehling et al. (2015)

Strukturtypen	Eigene Berechnungen		Jehling et al. (2015) Bebauungstypen				
	Nutz- energie kWh/a Geb.	End- energie kWh/a Geb.	EFH / Dörflich	RH / DH	Zeile / Plat- tenbau		Block
					MFH		
Endenergie kWh/a Geb.							
Freistehende Ein- und Zweifamilien- häuser	22.104	25.420	25.867 26.180				
Ein- und Zweifamili- enhäuser als Dop- pel- und Reihen- häuser	16.148	18.570		16.352 19.220			
Mehrfamilienhäuser in Zeilenstruktur	48.626	55.920			61.636 61.242		
Geschosswoh- nungsbau in offener Baustuktur	55.182	63.459				81.224	
Mehrfamilienhäuser in verdichteter Blockstruktur	51.052	58.710					58.109
Mehrfamilienhäuser in aufgelockerter Blockstruktur	53.298	61.292					

6.3 Potenzial regenerativer Energien im Fallbeispiel

Das regenerative Energiepotenzial beläuft sich für den Untersuchungsraum auf rund 9,6 GWh/a (Heizwert) aus organischen Abfällen der privaten Haushalte, 92 GWh/a Solarstrom und 247 GWh/a solare Wärme.

6.3.1 Biomasse

Das Gesamtaufkommen organischer Abfälle liegt für das Fallbeispiel bei 8.470 Tonnen pro Jahr. Hiervon entfallen rund 70 % auf krautige und holzige Grünabfälle und rund 30 % auf Nahrungsmittelabfälle. Je Einwohner sind dies im Durchschnitt 193 kg organische Abfälle. Abfallstatistiken des Fallbeispiels weisen für den Zeitraum 2006 bis 2015 ein durchschnittliches Grün- und Bioabfallaufkommen je Einwohner von 194 kg aus (EWL 2016).

Für die energetische Verwertung wurde der Einsatz von Blockheizkraftwerken mit Nahwärmenetz angenommen (vgl. Kapitel 5.2.4). Für die BHKWs wurde ein Gesamtwirkungsgrad von 85 % angesetzt. Hiervon entfallen 40 % auf elektrische Energie und 45 % auf thermische Energie. Nach Abzug der energetischen Aufwendungen für die Aufberei-

tung und Transfer der Wärme ergibt sich, ein energetischer Ertrag von rund 3,6 GWh/a Strom und 3,1 GWh/a Wärme.

Tab. 56: Energetisches Potenzial durch die Nutzung der organischen Abfälle aus privaten Haushalten

Strukturtypen	Potenzial organischer Abfälle	
	kWh/a (Heizwert)	kg/EW*a
Freistehende Ein- und Zweifamilienhäuser	5.435.414	340
Ein- und Zweifamilienhäuser als Doppel- und Reihenhäuser	1.260.176	124
Mehrfamilienhäuser in Zeilenstruktur	689.578	135
Geschosswohnungsbau in offener Baustruktur	473.645	196
Mehrfamilienhäuser in verdichteter Blockstruktur	561.099	103
Mehrfamilienhäuser in aufgelockerter Blockstruktur	1.170.779	136
Insgesamt	9.590.690	193

6.3.2 Solarenergie (Photovoltaik)

Aus den Berechnungen zur solaren Stromerzeugung ergibt sich bei einer 100 %igen Belegung der nutzbaren Dachflächen ein Potenzial von 92 GWh im Jahr (Tab. 57). Rund 70 % des solaren Strompotenzials wird durch die Bebauung mit Ein- und Zweifamilienhäusern bereitgestellt. Die verbleibenden, rund 30 %, werden durch den Bestand der Mehrfamilienhäuser erzeugt. Trotz bzw. gerade aufgrund der höheren baulichen Dichte der verdichteten Blockbebauung liegt der spezifische PV-Ertrag bei 271 MWh je Hektar Nettobauland und Jahr. Am geringsten fällt der spezifische Ertrag bei der Zeilenbebauung (122 MWh/ha*a) und in der freistehenden Einfamilienbebauung (147 MWh/ha*a) aus.

Tab. 57: Potenzial von Photovoltaik-Anlagen bei 100 %iger Nutzung der geeigneten Dachflächen

Strukturtypen	Potenzial Photovoltaik	
	kWh/a	MWh/ha _{NWBL} *a
Freistehende Ein- und Zweifamilienhäuser	43.734.271	147
Ein- und Zweifamilienhäuser als Doppel- und Reihenhäuser	18.709.078	204
Mehrfamilienhäuser in Zeilenstruktur	6.954.588	183
Geschosswohnungsbau in offener Baustruktur	3.274.689	122
Mehrfamilienhäuser in verdichteter Blockstruktur	7.818.134	271
Mehrfamilienhäuser in aufgelockerter Blockstruktur	11.959.742	185
Insgesamt / Durchschnitt	92.450.501	169

Legt man die Aufteilung der verfügbaren Dachfläche von 60 % PV und 40 % Solarthermie-Module zugrunde, dann reduziert sich das PV-Potenzial auf 55 GWh.

6.3.3 Solarenergie (Solarthermie)

Für die solare Wärmeerzeugung ergibt sich aus den Berechnungen ein Potenzial von 247 GWh im Jahr, bei einer 100 %igen Belegung der nutzbaren Dachflächen.

Tab. 58: Potenzial von Solarthermie bei 100 %iger Nutzung der geeigneten Dachflächen

Strukturtypen	Potenzial Solarthermie	
	kWh/a	MWh/h _{anWBL} *a
Freistehende Ein- und Zweifamilienhäuser	116.654.970	393
Ein- und Zweifamilienhäuser als Doppel- und Reihenhäuser	49.851.800	544
Mehrfamilienhäuser in Zeilenstruktur	18.763.428	494
Geschosswohnungsbau in offener Baustruktur	8.834.615	328
Mehrfamilienhäuser in verdichteter Blockstruktur	21.091.438	730
Mehrfamilienhäuser in aufgelockerter Blockstruktur	32.264.930	500
Insgesamt	247.461.180	452

Da den Berechnungen zur solaren Wärmebereitstellung die gleichen Annahmen wie beim PV-Potenzial zugrunde liegen, teilt sich das Solarthermiepotenzial ähnlich dem des PV-Potenzials auf die Strukturtypen auf. Dahingehend entfällt rund 70 % des solaren Wärmepotenzials auf den Bestand der Ein- und Zweifamilienhäuser und rund 30 % auf den Mehrfamilienhausbestand.

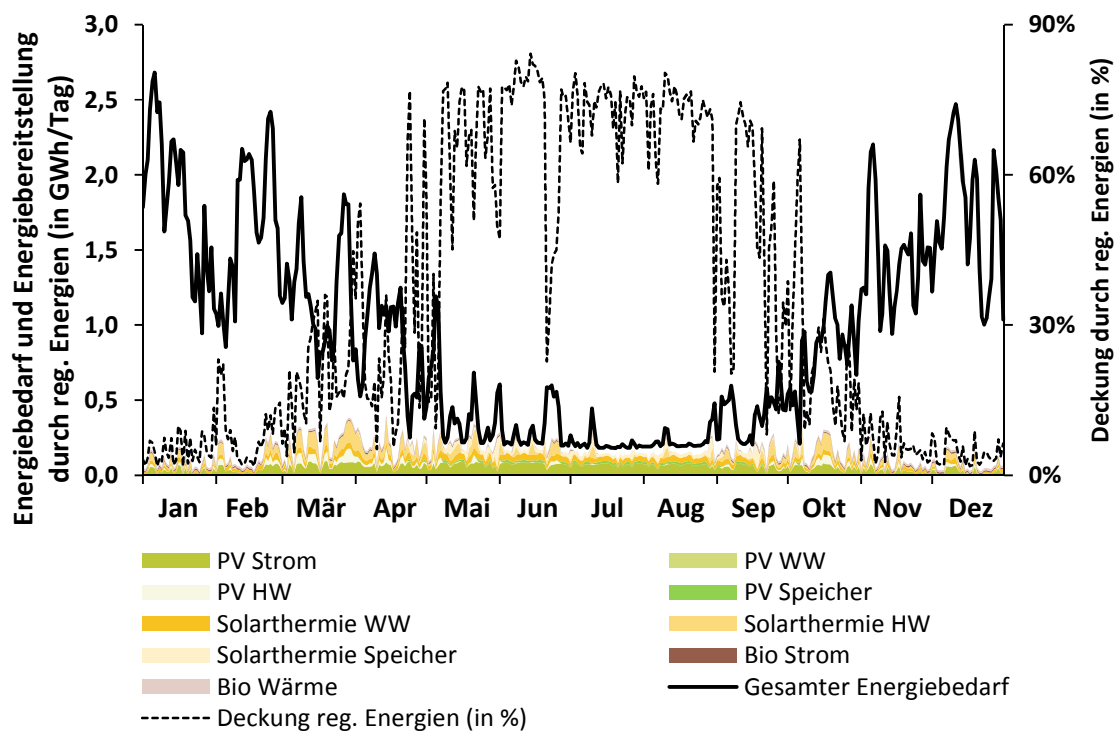
Nimmt man wie bereits zuvor die angenommene Aufteilung der verfügbaren Dachflächen von 60 % PV und 40 % Solarthermie-Module an, dann reduziert sich das Solarthermie-Potenzial auf 99 GWh.

6.4 Bilanzierung der stündlichen Last und der Energiebereitstellung

Die Gegenüberstellung des jährlichen Energiebedarfs und des regenerativen Energiepotenzials geben einen ersten Eindruck zum potenziellen Beitrag regenerativer Energien zur Energieversorgung des Untersuchungsgebietes. Häufig werden im Rahmen solcher Bilanzen Potenziale identifiziert, die den Energieverbrauch bzw. Bedarf zu großen Teilen decken könnten oder sogar übersteigen. So auch im vorliegenden Fallbeispiel, bei dem durch die aktive Nutzung von Solarenergie sowie durch organische Abfälle Strom und Wärme in Höhe von 58 GWh Strom und 104 GWh Wärme identifiziert wurden. Dies entspricht rund 96 % des Strombedarfs und rund 37 % des Wärmebedarfs. Insgesamt ergibt sich ein Deckungsgrad von 47 %. Auch wenn die hohe Variabilität regenerativer Energiequellen, insbesondere von Solar- und Windenergie, bekannt ist, wird dies nur selten in

Potenzialstudien und Energiekonzepten aufgegriffen. Daher wird nachfolgend der Jahresbilanz ein Vergleich auf stündlicher Basis gegenübergestellt.

Zur Wahrung der Übersichtlichkeit von Energiebedarf und Energiepotenzial mit Stundenintervallen werden nachfolgend für ausgewählte Zeiträume der Lastgang des Energiebedarfs und das stündliche Potenzial der regenerativen Energien aufgezeigt. Während eines Jahres durchläuft der Energiebedarf, aufgrund der klimatischen Bedingungen am Untersuchungsstandort, charakteristische Phasen. Der Heizwärmebedarf ist z. B. in den gemäßigten Breiten während der Heizperiode in den Monaten November bis März am höchsten. In den Sommermonaten wiederum sinkt der Heizwärmebedarf auf ein Minimum bzw. zeitweise sogar auf null ab. Auch der Strombedarf unterliegt leichten Veränderungen während des Jahres. Um die verschiedenen jahreszeitlichen Charakteristika zu berücksichtigen werden hierzu Auszüge aus der Heizperiode, der Übergangsperiode und der Sommerperiode abgebildet.



Grafik: Norbert Krauß

Abb. 56: Energiebedarf und Energiebeitrag regenerativer Energien in der Jahresübersicht

Zunächst wird anhand einer Jahresübersicht auf Tagesbasis der Beitrag der hier untersuchten regenerativen Energien dargestellt. Aus den Berechnungen geht ein potenzieller Beitrag der regenerativen Energien von 58 GWh hervor. Dies entspricht einer Deckungsrate von 17,2 % für das gesamte Jahr. Wie zu erwarten ist, können die regenerativen Energien insbesondere in den Monaten Mai bis September nennenswerte Anteile der Energienachfrage decken. Der gesamte regenerative Energiebeitrag führt in den Monaten Mai bis September zu Deckungsraten von etwa 40 % bis 85 %. In der Heizperiode

von November bis März hingegen sinkt der Beitrag der regenerativen Energien auf ein niedriges Niveau ab. Hier werden Deckungsraten von 3 % bis 30 % erreicht.

6.4.1 Winter

In den nachfolgenden Abbildungen (Abb. 57 und Abb. 58) werden der Beitrag regenerativer Energien zur Strom- und Wärmeversorgung während einer Woche in der Heizperiode veranschaulicht. Für die hier betrachteten sieben Tage im Januar (Heizperiode) zeigt sich für den Wärmebereich ein nur geringer Beitrag der regenerativen Energien. Dieser liegt bei rund 470 MWh im Vergleich zu 18.894 MWh Wärmebedarf (Heizwärme und Warmwasser). Dies entspricht einer Deckungsrate von rund 2,7 %.

Der Strombedarf hingegen kann für den ausgewählten Zeitraum zu 22 % durch regenerative Energien gedeckt werden. Hier stehen rund 300 MWh regenerativ erzeugter Strom 1.401 MWh Strombedarf gegenüber. Insbesondere in den Zeiten zwischen 10 Uhr und 14 Uhr kann der Strombedarf zu großen Anteilen durch die regenerativen Energien gedeckt werden. Während des betrachteten Zeitraums kommen die Stromspeicher nicht zum Einsatz, da die Stromlast das PV-Angebot durchweg übersteigt (Abb. 58). Der Beitrag des Bio-BHKW ist gering.

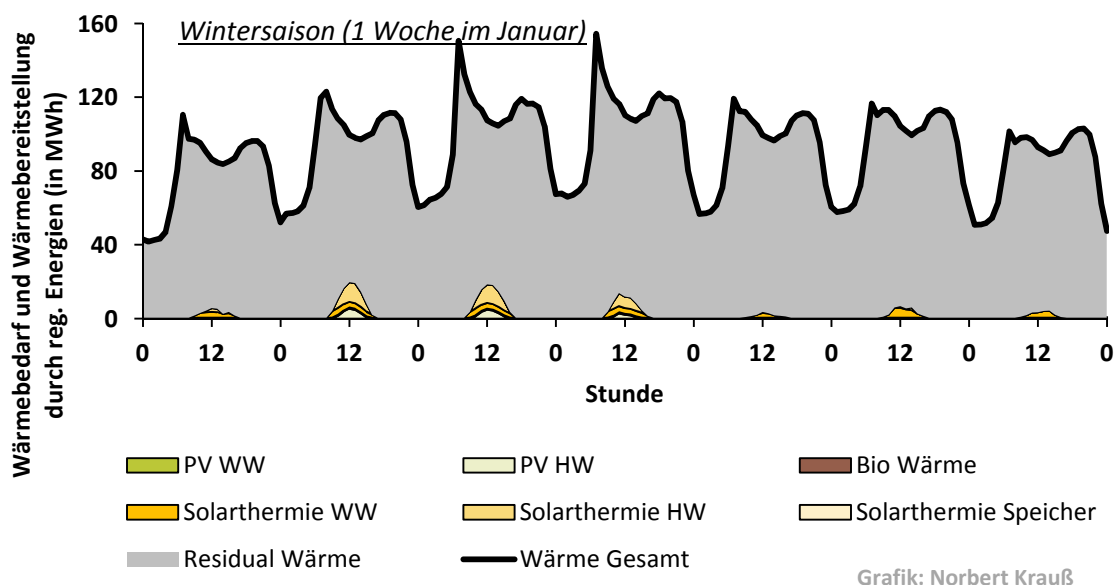


Abb. 57: Wärmebedarf und Wärmebereitstellung durch regenerative Energien

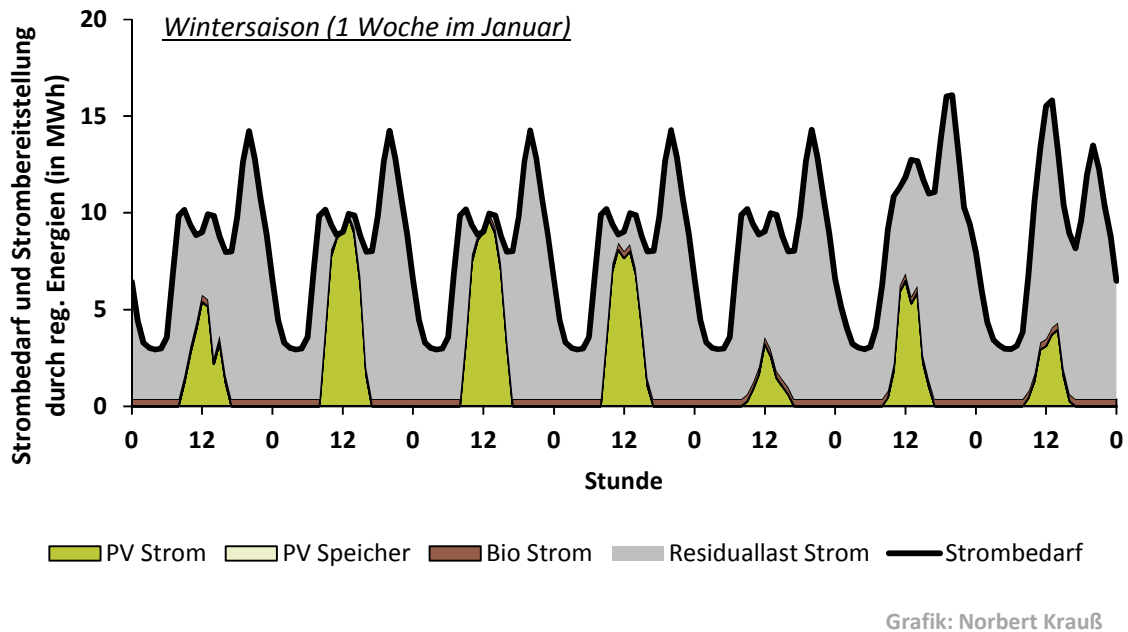


Abb. 58: Strombedarf und Strombereitstellung durch reg. Energien für 1 Woche im Januar

6.4.2 Übergang

Für den Zeitraum der Übergangsperiode wurde eine Woche (sieben Tage) Anfang Oktober ausgewählt. Im betrachteten Zeitraum besteht bereits ein gewisser Bedarf an Heizwärme zusätzlich zum Warmwasserbedarf. Der Wärmebedarf liegt für den Zeitraum bei rund 3 GWh. Durch die regenerativen Energien könnten hiervon im Durchschnitt rund 27 % und abschnittsweise bis zu 90-100 % gedeckt werden. Diese können erwartungsgemäß, während der Mittagsstunden erreicht werden (Abb. 59).

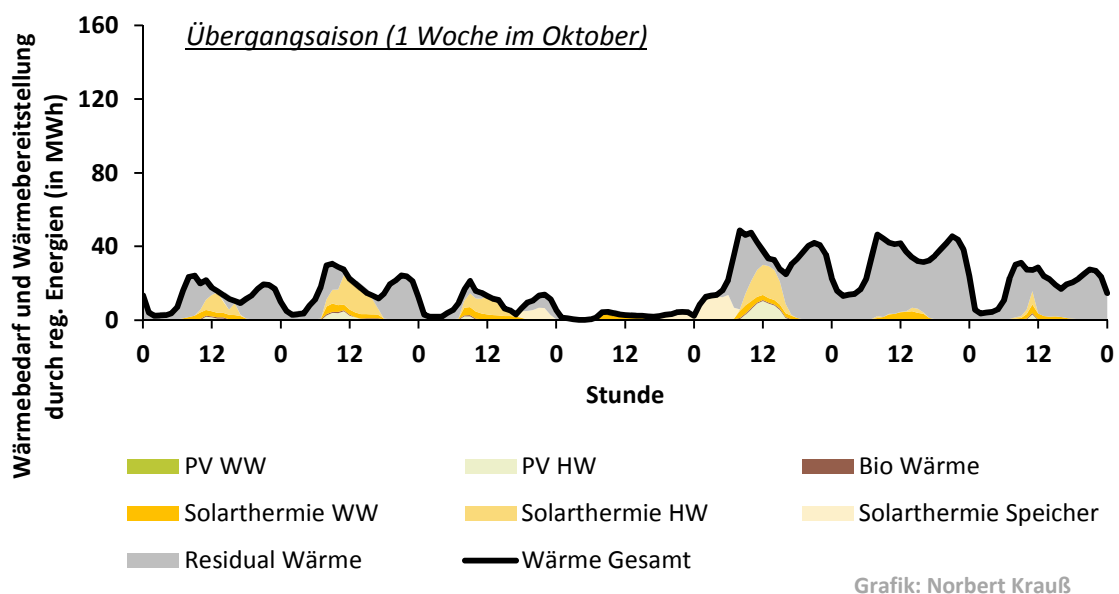
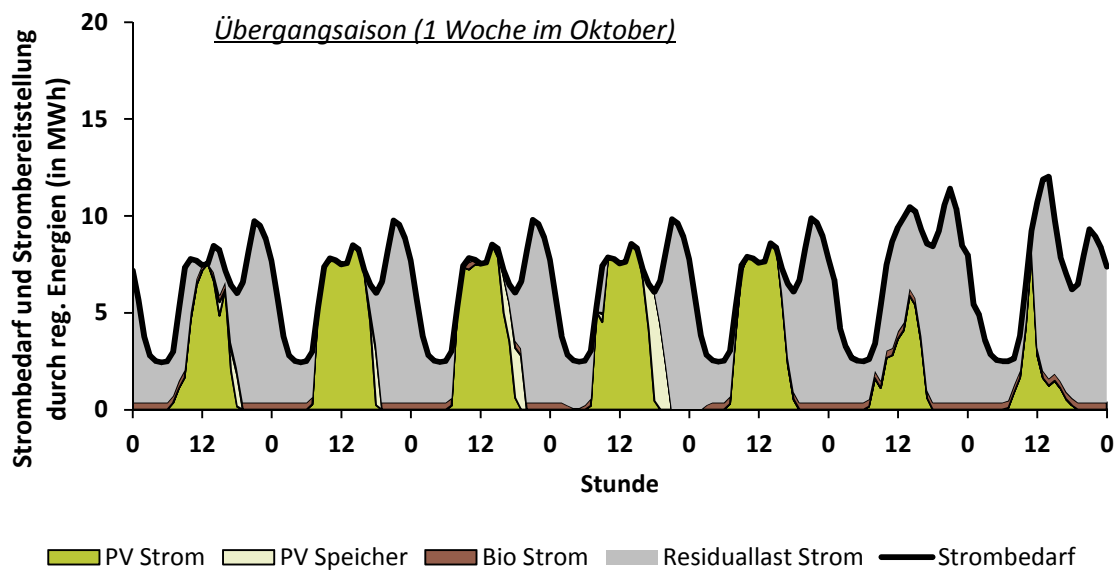


Abb. 59: Wärmebedarf und Wärmebereitstellung durch regenerative Energien in der Übergangsperiode



Grafik: Norbert Krauß

Abb. 60: Strombedarf und Strombereitstellung durch reg. Energien für 1 Woche im Oktober

Der Strombedarf wiederum, kann in besagtem Zeitraum zu 42 % durch regenerativ erzeugten Strom gedeckt werden. Der Großteil stammt hierbei aus der direkten Nutzung der PV-Anlagen (Abb. 60). Eingespeicherte PV-Überschüsse und der Strom aus dem BHKW machen nur einen vergleichsweise geringen Anteil aus.

6.4.3 Sommer

Für die Sommersaison wurde eine Woche Anfang August ausgewählt. Wie in Abb. 61 zu sehen ist, wird in erheblichem Umfang solarer Strom und insbesondere Solarthermie bereitgestellt. Aufgrund des geringen Wärmebedarfs in den Sommermonaten kann nur ein geringer Anteil der erzeugten Solarthermie (für Warmwasser) genutzt werden. Infolge des geringen Wärmebedarfs kann eine Deckungsrate des Wärmebedarfs von 100 % erreicht werden. Die Wärmespeicher haben hierbei einen erheblichen Anteil. So kann hierdurch in den Abend- und Nachtstunden der Wärmebedarf vollständig gedeckt werden. Aufgrund der hohen solaren Einstrahlung in den Sommermonaten können auch beim Strombedarf hohe Deckungsraten erreicht werden. So auch im betrachteten Zeitraum im August. Während dieser Zeit können an vier der sieben Tage Deckungsraten von über 70 % erreicht werden. Die durchschnittliche Deckungsrate liegt bei 54 %. Aufgrund zeitweiser PV-Überschüsse können die Speicher beladen werden. Die gespeicherte Energie wird bei sinkender Einstrahlung wiederum zur Deckung des Strombedarfs genutzt. Ein Beitrag durch die energetische Verwertung der Biomasse erfolgt während dieses Zeitraums nicht, da die Anlage wärmegeführt betrieben wird und somit stillsteht (Abb. 62).

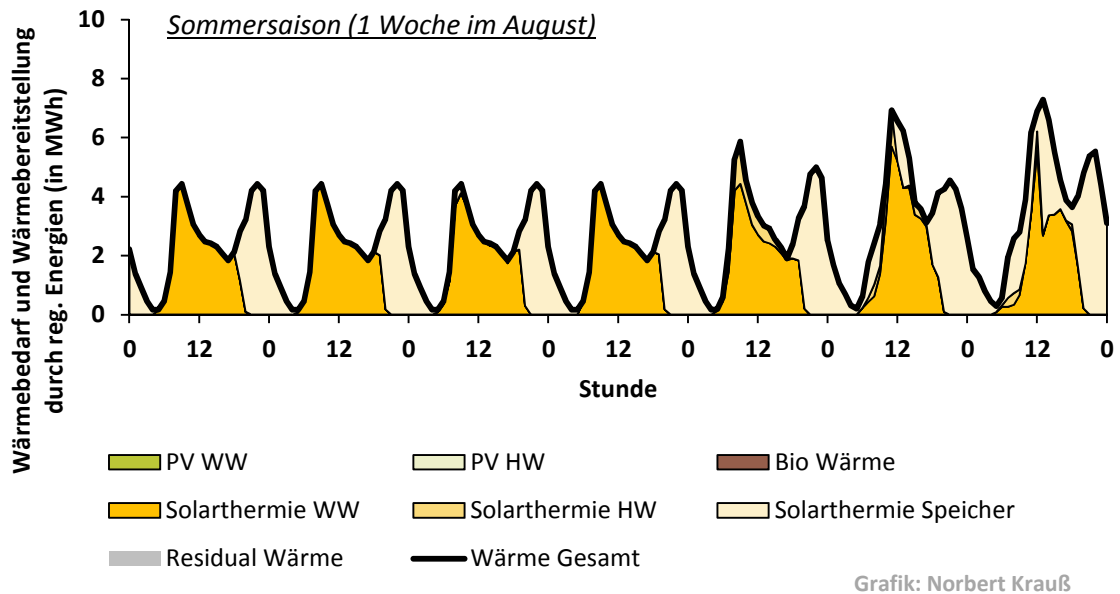


Abb. 61: Wärmebedarf und Wärmebereitstellung durch regenerative Energien für 1 Woche im August

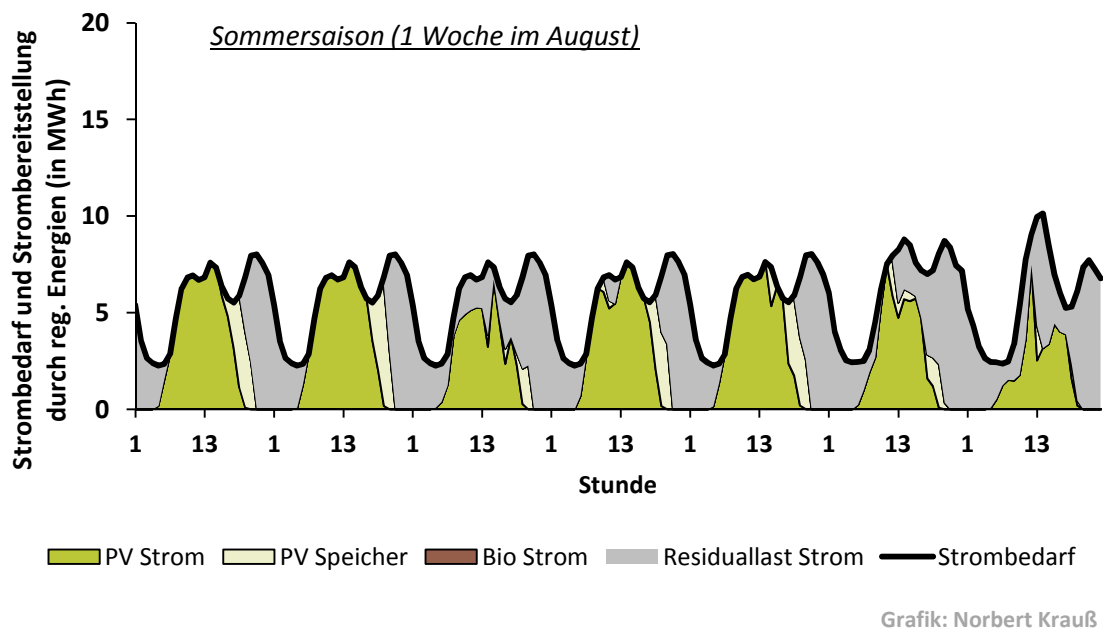


Abb. 62: Strombedarf und Strombereitstellung durch reg. Energien für 1 Woche im August

6.5 Sensitivitätsanalysen

Auf Basis der zuvor dargelegten Daten, Annahmen und des Berechnungsansatzes wurde das technische Potenzial von Solar- und Bioenergie für das zugrundeliegende Fallbeispiel ermittelt. Auf Grund von Datenlücken mussten u. a. für Dachneigung, Dachausrichtung und bauliche Dichte Annahmen getroffen werden. Auch der Einsatz historischer Wetterdaten ermöglicht lediglich die Berechnung, z. B. von Solarenergiepotenzialen in Untersuchungsgebieten, bei vergleichbaren klimatischen Verhältnissen. Der weltweit beobachtete und nachgewiesene Klimawandel führt jedoch zu sich, teils stark veränderten klimatischen Verhältnissen je nach Region. Dies führt zu Unsicherheiten bei den berechneten Potenzialen. Hieraus leiten sich z. B. Fragen nach dem Einfluss eines veränderten Klimas sowie nach dem Einfluss von Speichersystemen und deren Dimensionierung auf den Beitrag regenerativer Energien ab. Zur Berechnung entsprechender Effekte wurde aus einer Vielzahl an Variablen eine Auswahl relevanter Variablen getroffen, für die Sensitivitätsanalysen durchgeführt wurden. Als besonders sensitive und einflussreiche Variablen wurden die klimatischen Rahmenbedingungen, bauliche Dichte, Gebäudeenergieeffizienz und die Dimensionierung von Strom- und Wärmespeichern ausgewählt.

6.5.1 Extremer Winter und extremer Sommer

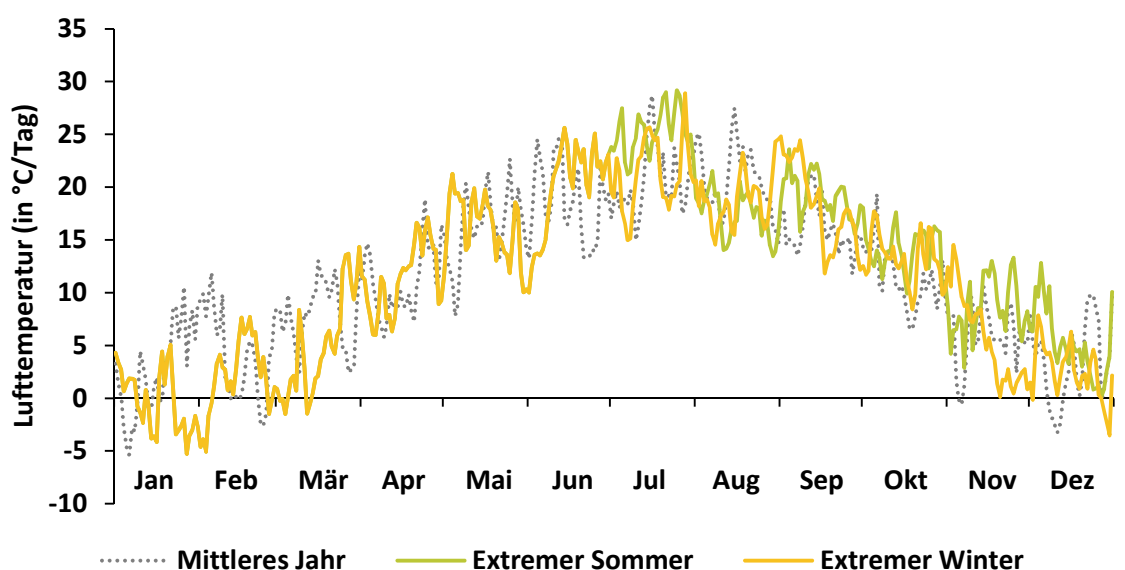
Der Energiebedarf einer Stadt wird neben baulichen, technischen und weiteren insbesondere durch lokale klimatische Bedingungen beeinflusst. Wie bereits in Kapitel 4 angeführt, wurden zur Modellierung der Energielast und des regenerativen Energieangebots Daten des Testreferenzjahr-Datensatzes verwendet. Als Ausgangsbasis für die Modellierung wurden die Datensätze des „mittleren“ Testreferenzjahres, welches auf Klimadaten der Jahre 1988 bis 2007 beruht, verwendet. Ein solches „mittleres“ Testreferenzjahr beschreibt die „mittleren“ klimatischen Bedingungen eines Jahres, während des Zeitraums 1988 bis 2007.

Neben dem Datensatz eines „mittleren“ Testreferenzjahres stehen darüber hinaus zwei weitere Datensätze, die extreme klimatische Ausprägungen veranschaulichen, zur Verfügung. Die beiden Datensätze geben die klimatischen Verhältnisse eines „extremen Winters“ und eines „extremen Sommers“ wieder.

Um die Auswirkungen möglicher klimatischer Veränderungen und deren Einfluss auf das Potenzial regenerativer Energien an der Fallstudie zu testen, wurden die Berechnungen jeweils mit dem Datensatz „extremer Winter“ und „extremer Sommer“ durchgeführt. Durch die veränderten klimatischen Daten kommt es zu Veränderungen der Lufttemperatur und der solaren Einstrahlung, wodurch sich auch thermische Lastgänge und das solarenergetische Potenzial ändern.

Variante 1 – Extremer Winter

Die klimatischen Bedingungen im Datensatz „extremer Winter“ zeichnen sich gegenüber dem „mittleren Jahr“ durch leicht kühlere Lufttemperaturen in der zweiten Jahreshälfte, insbesondere jedoch in den Monaten November und Dezember aus. In der ersten Jahreshälfte liegen die mittleren Tagestemperaturen ebenfalls unter den Temperaturen des „mittleren Jahres“. Dies trifft besonders auf die Monate Januar, Februar und März zu (Abb. 63). Die Kennwerte der solaren Strahlung liegen ebenfalls leicht unter den Strahlungswerten des „mittleren Jahres“. Im Durchschnitt liegen diese rund 1 - 2 % über den Strahlungswerten des „mittleren Jahres“.



Grafik: Norbert Krauß

Abb. 63: Jahresverlauf der Lufttemperatur (in °C/Tag) für die Referenz-Variante, Extremer Sommer und Extremer Winter

Infolge der veränderten klimatischen Daten kommt es in Variante 1, trotz der leicht erhöhten solaren Strahlungswerte, zu einem geringen Absinken des Beitrags regenerativer Energien von 58 GWh auf 56,9 GWh. Dies führt weiterhin zu einem Absinken der Deckungsrate auf 16,8 %.

Variante 2 – Extremer Sommer

Der Datensatz, der den Berechnungen für Variante 2 – Extremer Sommer zugrunde liegen, zeichnet sich vorrangig durch mildere Lufttemperaturen in der zweiten Jahreshälfte aus. In der ersten Jahreshälfte dagegen liegen die mittleren Tagestemperaturen besonders in den Monaten Januar, Februar und März unter dem Datensatz des „mittleren Jahres“ (Abb. 63). Auch die solare Strahlung weicht infolgedessen ab und liegt im Durchschnitt zwischen 3 - 7 % über den Strahlungswerten des „mittleren Jahres“.

Wie auch in Variante 1 – Extremer Winter kommt es trotz höherer solarer Strahlungswerte in Variante 2 zu einem leichten Abfall des regenerativen Energiebeitrags. Dieser liegt mit 56,6 GWh leicht unter dem „mittleren Jahr“ mit 58 GWh. Die Deckungsrate sinkt infolgedessen auf 16,7 %.

6.5.2 Bauliche Dichte

Die bauliche Dichte ist ein Ausdruck, der wie in Kapitel 3.1.2 dargelegt, sich aus den beiden Kennwerten Geschossflächendichte (GFD) und Grundflächendichte (GRD) zusammensetzt. Eine Veränderung von Geschossflächendichte (GFD) und/oder Grundflächendichte (GRD) verändert das Verhältnis von Geschossfläche und bebauter Fläche gegenüber der Freifläche. Eine reduzierte GFD führt bei gleichbleibender Grundstücksgröße zu sinkender und bei erhöhter GFD zu steigender Geschossfläche. Im Falle der GRD, führt eine Senkung, bei gleichbleibender Grundstücksgröße, zu sinkender Überbauung und bei einer Erhöhung, zu einer steigenden Überbauung.

Da im Modell die Geschossfläche von der Wohnfläche abgeleitet wird und diese wiederum für die einzelnen Gebäudetypen, auf Basis der Statistik, festgelegt wurde, führt eine Veränderung der Geschossflächendichte ausschließlich zu einer Reduzierung oder Erhöhung der Grundstücksfläche. Um jedoch eine Vergleichbarkeit der Berechnungen zu gewähren wird von einer Veränderung der Geschossflächendichte Abstand genommen. Infolgedessen bleibt für eine Analyse unterschiedlicher baulicher Dichten die Variation der Grundflächendichte. Hierdurch kommt es zu keiner Veränderung der Fläche des Nettowohnbaulands bei allen Berechnungen wodurch die Vergleichbarkeit gegeben ist.

Aufgrund des hinterlegten Berechnungsansatzes ist zu erwarten, dass bei einer erhöhten GRD der Anteil an Grünfläche und somit auch die Masse organischer Grünabfälle sinkt. Im Umkehrschluss führt eine Reduzierung der GRD zu einer steigenden Masse organischer Grünabfälle. Durch die Veränderung der GRD wird neben der Freifläche auch die nutzbare Dachfläche beeinflusst (vgl. 5.1.4). Gemäß dem hinterlegten Berechnungsansatz ist bei einer sinkenden GRD mit einer Reduzierung und bei einer steigenden GRD mit einer Zunahme der verfügbaren Dachfläche zu rechnen. Für die Sensitivitätsanalyse werden daher zwei Varianten berechnet. In Variante 1 wird die Grundflächendichte in allen Bebauungsstrukturen reduziert. In Variante 2 wird die Grundflächendichte demgegenüber für die Strukturtypen erhöht. In Abhängigkeit der Variante werden für die Berechnung jeweils spezifische Gebäudevertreter verwendet. Diese Gebäudevertreter unterscheiden sich insbesondere in der Anzahl ihrer Vollgeschosse, da die Wohn- und Geschossflächen gleichbleiben. In den nachfolgenden Tabellen (Tab. 59, Tab. 60) sind zentrale Kennwerte der Gebäudevertreter für die verschiedenen Varianten aufgeführt.

Tab. 59: Grundflächendichte in der Basisvariante und den Sensitivitätsanalysen

Strukturtypen	Basisvariante	Sensitivitätsanalyse (reduzierte GRD)	Sensitivitätsanalyse (erhöhte GRD)
	m^2_{BF}/m^2_{NWBL}	m^2_{BF}/m^2_{NWBL}	m^2_{BF}/m^2_{NWBL}
Freistehende Ein- und Zweifamilienhäuser	0,17	0,13	0,23
Ein- und Zweifamilienhäuser als Doppel- und Reihenhäuser	0,24	0,18	0,26
Mehrfamilienhäuser in Zeilenstruktur	0,22	0,18	0,24
Geschosswohnungsbau in offener Baustruktur	0,14	0,12	0,15
Mehrfamilienhäuser in verdichteter Blockstruktur	0,33	0,27	0,36
Mehrfamilienhäuser in aufgelockerter Blockstruktur	0,22	0,18	0,25

Tab. 60: Mittlere Anzahl der Vollgeschosse in der Basisvariante und den Sensitivitätsanalysen

Strukturtypen	Basisvariante	Sensitivitätsanalyse (reduzierte GRD)	Sensitivitätsanalyse (erhöhte GRD)
	Anzahl Vollgeschosse	Anzahl Vollgeschosse	Anzahl Vollgeschosse
Freistehende Ein- und Zweifamilienhäuser	1,8	2,3	1,3
Ein- und Zweifamilienhäuser als Doppel- und Reihenhäuser	2,5	3,3	2,3
Mehrfamilienhäuser in Zeilenstruktur	3,3	4,0	3,0
Geschosswohnungsbau in offener Baustruktur	3,3	4,1	3,1
Mehrfamilienhäuser in verdichteter Blockstruktur	3,4	4,1	3,0
Mehrfamilienhäuser in aufgelockerter Blockstruktur	3,3	4,0	3,0

Sensitivitätsanalyse Variante 1 – reduzierte Grundflächendichte

Die Verringerung der GRD führt, wie zuvor geschildert, zu einem Anstieg der Freifläche. Infolgedessen steigt die Grünfläche von 2,8 km² auf 3,0 km² an. Damit erhöht sich die anfallende Biomasse, von 8.470 Tonnen auf 8.955 Tonnen im Jahr. Diese Steigerung der Biomasse erfolgt ausschließlich durch zusätzliche Grünabfälle. Die Lebensmittelabfälle

verändern sich nicht, da die Struktur der Bewohnerschaft und Haushalte unverändert bleibt. Insgesamt resultiert hieraus ein energetisch nutzbares Biomassepotenzial von 10,2 GWh/a. Neben dem gestiegenen Biomassepotenzial führt die reduzierte Grundflächendichte auch zu einer Reduzierung des nutzbaren Dachflächenpotenzials. Die potenzielle Modul- bzw. Panelfläche sinkt um rund 23 % auf 0,95 km².

Die Absenkung der Grundflächendichte beträgt im Durchschnitt etwa 20 % gegenüber der Basisvariante. Bei den Strukturtypen bewegt sich die Grundflächendichte-Reduktion zwischen 15 % und 25 %. Durch die reduzierte Grundflächendichte bzw. durch die durchgängig höhere Anzahl an Stockwerken der Wohngebäude sinkt, trotz des größeren Umfangs an Biomasse, der regenerativen Energiebeitrag auf 52 GWh. Infolgedessen sinkt die Deckungsrate auf 15,4 %.

Sensitivitätsanalyse Variante 2 – erhöhte Grundflächendichte

Eine Erhöhung der Grundflächendichte durch eine Reduzierung der durchschnittlichen Anzahl an Vollgeschossen bei den Gebäudevertretern führt zu einem Absinken der Grünfläche. Die Grünfläche sinkt hierdurch um rund 8 % auf 2,6 km² im Fallbeispiel. Als Folge sinkt auch die theoretisch verfügbare Biomasse von 8.470 Tonnen auf 8.000 Tonnen im Jahr. Die Einbußen der Biomasse sind ausschließlich das Resultat der reduzierten Grünfläche. Wie in Variante 1 verändert sich die Menge an Lebensmittelabfällen nicht. Insgesamt verringert sich hierdurch das energetisch nutzbare Biomassepotenzial von 9,6 GWh/a auf 9,0 GWh/a. Dem gesunkenen Biomassepotenzial steht ein Anstieg der Dachfläche und damit der solarenergetisch nutzbaren Fläche gegenüber. So führt die reduzierte vertikale Bauweise der Gebäudevertreter zu einem Anstieg der nutzbaren Dachfläche um rund 21 %. Infolgedessen steht ein theoretisches solarenergetisches Potenzial von 185 GWh pro Jahr zur Verfügung anstellen von 154 GWh/a in der Basisvariante. In Variante 2 erhöht sich die Grundflächendichte im Durchschnitt um etwa 20 %. Bei den Strukturtypen bewegt sich die Steigerung der Grundflächendichte zwischen 6 % und 35 %. Durch den hohen Anstieg der Dachflächen kann das reduzierte theoretische Biomassepotenzial überkompensiert werden, so dass der potenzielle Beitrag regenerativen Energien von 59 GWh auf 65 GWh ansteigt. Dies hat zur Folge, dass sich die Deckungsrate auf 19,1 % erhöht.

6.5.3 Thermische Verbesserung von Wohngebäuden

In der Sensitivitätsanalyse „thermische Verbesserung von Wohngebäuden“ soll geprüft werden, welchen Einfluss die energetische Verbesserung des Wohngebäudebestands, z. B. durch Sanierungsmaßnahmen, im Fallbeispiel auf den Beitrag der regenerativen Energien hat. Aufgrund fehlender Informationen zum Sanierungsstand und hoher Unsicherheiten bei der Abschätzung von Sanierungstätigkeiten sowie deren Wirkung, wurden vereinfacht Annahmen zur durchschnittlichen energetischen Verbesserung des Wohnge-

bäudebestands gesetzt. In der ersten Variante (Var. 1) wird von einer durchschnittlichen Sanierungswirkung von 10 % auf die Energiekennwerte ausgegangen und in der zweiten Variante (Var. 2) von um 20 % verringerten Energiekennwerten.

Variante 1 – Erhöhte energetische Effizienz (10 %)

Eine Verbesserung der thermischen Effizienz des Wohngebäudebestands durch Sanierungsmaßnahmen und verbesserte Haustechnik von 10 % führt zu einer Verringerung des Heizwärmebedarfs um 25 GWh/a. Der Heizwärmebedarf liegt damit bei 232 GWh/a. Infolge der veränderten Lastgänge sinkt der Beitrag regenerativer Energien auf 57 GWh/a leicht ab. Trotz des leicht gesunkenen Beitrags regenerativer Energien steigt die Deckungsrate der regenerativen Energien auf 18,3 % an.

Variante 2 – Erhöhte energetische Effizienz (20 %)

Infolge einer thermischen Effizienzsteigerung im Wohngebäudebestand um 20 % sinkt der Heizwärmebedarf um 51 GWh/a auf 206 GWh/a ab. Die verbesserte Effizienz im Wohngebäudebestand führt somit zu einer Steigerung der Deckungsrate der regenerativen Energien auf 19,9 %.

6.5.4 Speicherdimension

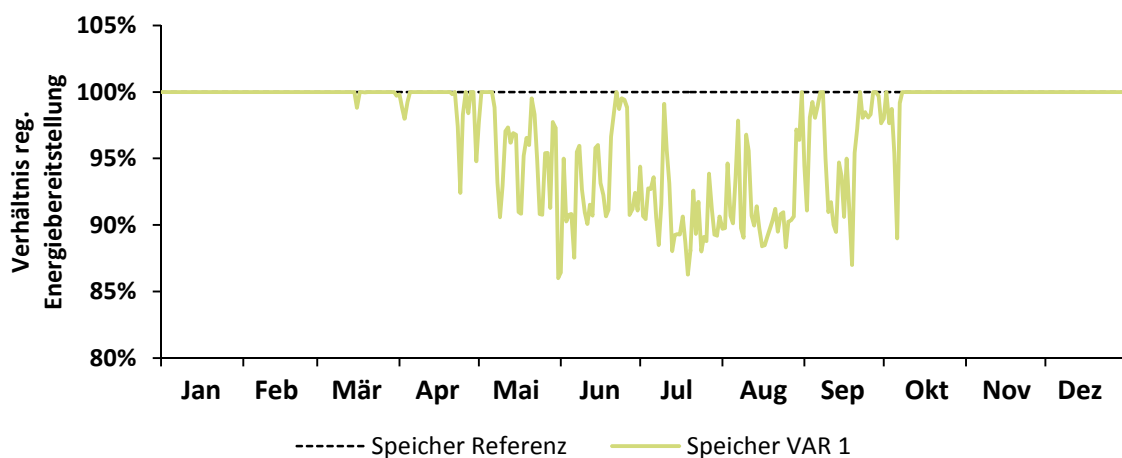
Ein weiterer Aspekt ist die Bedeutung von Speichersystemen für die regenerative Energieversorgung. Im Rahmen dieser Sensitivitätsanalysen sollte untersucht werden, welchen Einfluss Energiespeicher auf den Beitrag regenerativer Energien zur Energieversorgung haben. Hierzu wurden die Kapazitäten der Energiespeicher in zwei Varianten angepasst. In Variante 1 (Var. 1) wurde den Stromspeichern eine Kapazität von null zugewiesen. Für die Wärmespeicher wurde die Speicherkapazität auf 70 Liter je m² Kollektorfläche reduziert, was den gängigen Größenordnungen bei einer solarthermischen Deckung von 60 % Warmwasser entspricht. Für die Variante 2 (Var. 2) wurde die Kapazität der Stromspeicher gegenüber der Basisvariante des Fallbeispiels verdoppelt. Hieraus ergibt sich eine Speicherkapazität je Wohneinheit von rund 1,4 kWh in Mehrfamilienhäusern, 2,2 kWh in Reihen- und Doppelhäusern und 2,8 kWh in freistehenden Ein- und Zweifamilienhäusern. Gleiches gilt für die thermischen Speicher, was einem Speichervolumen von 400 Liter je m² Kollektorfläche entspricht. Alle anderen Eingangsdaten und Annahmen wurden gemäß der Basisvariante des Fallbeispiels übernommen.

Variante 1 – keine Stromspeicher und kleine Wärmespeicher

Aus den zugrunde liegenden Setzungen ergibt sich für die Variante 1 ein regenerativer Energiebeitrag von 57 GWh/a. Dies sind rund 2 GWh bzw. 3 % weniger als in der Basisvariante des Fallbeispiels. Die Gesamtdeckungsrate sinkt somit auf 16,7 % ab. Der

Strombedarf kann zu 36 % und der Wärmebedarf zu 12,3 % durch regenerative Energien gedeckt werden.

Abb. 64 veranschaulicht den Einfluss einer fehlenden bzw. verringerten Speicherkapazität. Die Basisvariante des Fallbeispiels wird in der Abbildung als 100 % Line dargestellt (gestrichelte Linie in Abb. 64). Zum Vergleich wurde die Speicher-Variante 1 in Verhältnis zur Basisvariante des Fallbeispiels gesetzt. Es zeigt sich, dass in den Monaten Mai bis September der Beitrag regenerativer Energien um bis zu 12 % unter der Basisvariante des Fallbeispiels liegt. Aufgrund der geringen PV- bzw. solarthermischen Energieerzeugung in den Monaten November bis März zeigen sich hier keine nennenswerten Veränderungen in der bereitgestellten regenerativen Energie.



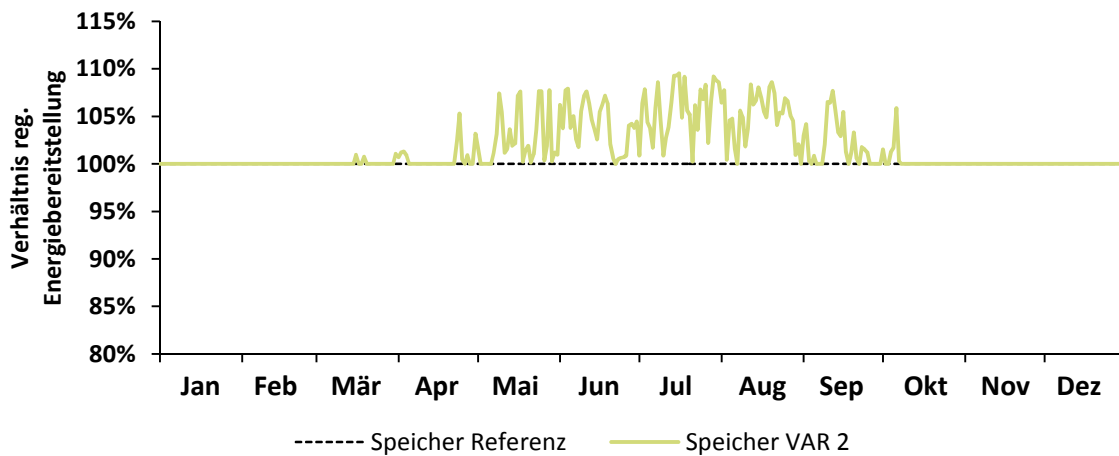
Grafik: Norbert Krauß

Abb. 64: Energiebereitstellung in „Speicher-Variante 1“ im Verhältnis zur Basisvariante des Fallbeispiels

Variante 2 – Hohe Strom- und Wärmespeicherkapazität

Aus den zugrunde liegenden Setzungen ergibt sich für die Variante 2 ein regenerativer Energiebeitrag von 60 GWh. Dies sind rund 1 GWh bzw. 2 % mehr als in der Basisvariante des Fallbeispiels. Die Gesamtdeckungsrate steigt infolgedessen auf 17,5 %. Der Strombedarf kann zu 40 % und der Wärmebedarf zu 12,4 % durch regenerative Energien gedeckt werden.

Wie auch in Variante 1 wurde die regenerative Energiebereitstellung der Variante 2 der Basisvariante des Fallbeispiels gegenübergestellt (Abb. 65). Aufgrund der erhöhten Speicherkapazität ergibt sich für die Monate Mai bis September ein erhöhter Beitrag regenerativer Energien von bis zu 10 % gegenüber der Basisvariante des Fallbeispiels. Auch in Variante 2 ergeben sich aufgrund der geringen PV- bzw. solarthermischen Energieerzeugung in den Monaten November bis März keine Veränderungen in der Bereitstellung regenerativer Energien.

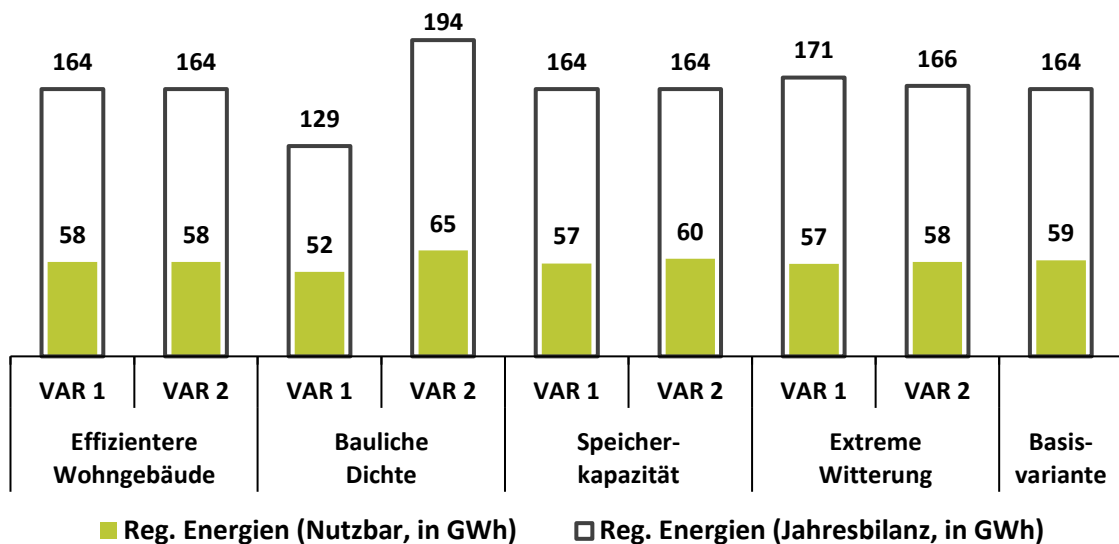


Grafik: Norbert Krauß

Abb. 65: Energiebereitstellung in „Speicher-Variante 2“ im Verhältnis zur Basisvariante des Fallbeispiels

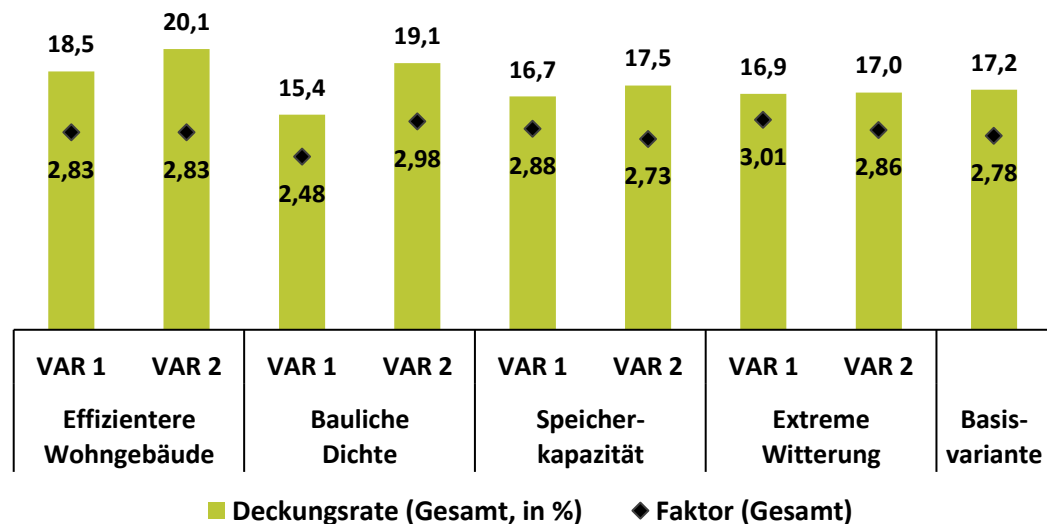
6.5.5 Zusammenfassung der Sensitivitätsanalysen

Aus den zuvor dargelegten Sensitivitätsanalysen gehen für die Jahresbilanz regenerative Energiepotenziale in Höhe von 129 GWh bis 194 GWh hervor (Abb. 66). Aus der lastgerechten Modellierung gehen demgegenüber Potenziale in Höhe von 52 GWh bis 65 GWh hervor (Abb. 66). Dies entspricht im Durchschnitt etwa einer Differenz zwischen Jahresbilanz und lastgerechter Modellierung von rund 2,5 bis 3,0 (Abb. 67).



Grafik: Norbert Krauß

Abb. 66: Bilanzielle (Jahresbilanz) und modellierte (nutzbar) Energiebereitstellung durch reg. Energien für die Basisvariante des Fallbeispiels und die Sensitivitätsanalysen



Grafik: Norbert Krauß

Abb. 67: Deckungsgrad des Energiebedarfs durch reg. Energien und Faktoren für die Basisvariante des Fallbeispiels und die Sensitivitätsanalysen

Wie aus Abb. 67 weiterhin hervorgeht, liegen die ermittelten Deckungsraten der Sensitivitätsanalysen zwischen 15,4 % und 20,1 %. Die Basisvariante des Fallbeispiels zum Vergleich liegt bei 17,2 %. D. h., dass, auf Basis einer stündlichen Modellierung, 17,2 % des Energiebedarfs durch regenerative Energien gedeckt werden können.

Hervorzuheben sind die Ergebnisse für den effizienteren Gebäudebestand. In beiden Varianten werden im Vergleich zu den anderen Analysen hohe Deckungsraten erzielt. Insbesondere in Variante 2 wird die höchste Deckungsrate erreicht. Die Deckungsraten liegen in Variante 1 bei 18,5 % und in Variante 2 bei 20,1 %. Die Steigerung beträgt für Variante 1 rund 8 % bei einer 10 %igen Effizienzsteigerung und für Variante 2 eine Steigerung um rund 17 % bei einer 20 %igen Effizienzsteigerung. Der hohe Anstieg der Deckungsrate resultiert vorrangig aus der Reduktion des Heizwärmebedarfs, von 257 GWh auf 232 GWh in Variante 1 und 206 GWh in Variante 2. Da die Nachfrage nach Heizwärme saisonal bedingt ist, sinkt der Heizwärmebedarf vorrangig in den Wintermonaten. Dies hat zur Folge, dass sich der antizyklische Verlauf, zwischen Energiebedarf und Energieangebot reduziert. Die verhältnismäßig leicht höhere Steigerung der Deckungsrate je Prozentpunkt Effizienzsteigerung in Variante 2, resultiert aus solarenergetischen Überschüssen, die infolge des gesunkenen Heizwärmebedarfs durch die Speichersysteme zu einem späteren Zeitpunkt genutzt werden können. So werden in Variante 2 durch die Speichersysteme rund 6,9 GWh bereitgestellt. In der Basisvariante des Fallbeispiels und der Variante 1 der verbesserten Gebäudeeffizienz liegt der Beitrag der Speichersysteme bei 6,5 GWh (Basisvariante des Fallbeispiels) bzw. 6,3 GWh (Variante 1).

Die Sensitivitätsanalysen bezüglich der Grundflächendichte weisen ebenfalls auf die hohe Bedeutung der baulichen Dichte bei Fragen der regenerativen Energieversorgung hin. So resultiert aus der reduzierten Grundflächendichte bzw. der höheren durchschnittlichen Anzahl an Vollgeschossen in Variante 1 (Bauliche Dichte) der geringste Deckungsbeitrag in den Sensitivitätsanalysen. Mit einem Deckungsgrad von 15,4 % besitzt die Variante den niedrigsten Kennwert. Dies resultiert aus der stark verringerten Verfügbarkeit von Dachflächen für die solarenergetische Nutzung. Auch das gestiegene Biomassepotenzial kann dies nur zu einem sehr geringen Anteil abfedern. Interessanterweise sinkt in Variante 1 die Differenz zwischen der Jahresbilanz und der stündlichen Modellierung auf rund 2,5 ab. Dies ist das Resultat des gesunkenen Anteils solarer Energie (Strom und Wärme) und dem damit einhergehenden sinkenden Anteil solarer Energie, die aufgrund der antizyklischen Verfügbarkeit, nicht genutzt werden kann. Auch der leicht höhere Anteil an Energie aus Biomasse trägt zu dem verringerten Differenzfaktor von 2,5 bei. Demgegenüber wird in Variante 2 (Bauliche Dichte) ein Deckungsgrad von 19,1 % erreicht und der Differenzfaktor steigt auf rund 3,0 an. Wie zu erwarten war, zeigt sich hierbei eine entgegengesetzte Entwicklung. Durch die steigende solarenergetisch nutzbare Dachfläche steigt auch der Beitrag von PV und Solarthermie, was, aufgrund der antizyklischen Verfügbarkeit, zu einer größeren Differenz zwischen Jahresbilanz und stündlicher Modellierung führt. Das sinkende Biomassepotenzial verstärkt diesen Effekt noch zusätzlich. Neben den Veränderungen der regenerativen Energieertragsflächen kann sich eine veränderte bauliche Dichte auch auf Heizwärme- und Kühlbedarf Einfluss nehmen. Beispielsweise durch den verstärkten oder reduzierten Effekt der Wärmeinsel aber auch durch eine verringerte Gebäudehüllfläche. Untersuchungen beispielsweise von Ratti, C. *et al.* (2005) und Rode, P. *et al.* (2014) deuten auf einen entsprechenden Zusammenhang hin. Aufgrund der hohen Komplexität solcher Effekte wurden diese jedoch hier nicht berücksichtigt.

Einen geringeren Einfluss zeigt sich bei der Variation der Speicherkapazität. So führt eine Verdopplung der Speicherkapazität, auf 1,4 kWh je Wohneinheit (MFH) bis 2,7 kWh je Wohneinheit (EZH), zu einer Steigerung der Deckungsrate um rund 2 %. Die geringe Steigerung der Deckungsrate ist das Resultat des antizyklischen Verlaufs von Energiebedarf und dem Potenzial von Solarenergie. So kann in den Sommermonaten die zusätzlich zur Verfügung stehende solarelektrische und -thermische Energie nur begrenzt genutzt werden. Aufgrund der langen Sonnenscheindauer und deren Intensität sinkt der Bedarf an Strom für die künstliche Beleuchtung im Sommer. Der in den Abend- und Nachtstunden verbleibende Strombedarf wird durch die zunehmende Verfügbarkeit von gespeichertem PV-Strom gedeckt. In diesem Fall führt auch eine weitere Steigerung der Speicherkapazität zu immer geringeren Beiträgen. Gleiches gilt für den Wärmebereich. So wird durch die thermische Solarenergie bereits ein großer Teil des ohnehin geringen Wärmebedarfs für Warmwasser gedeckt. Eine Erhöhung der Speicherkapazität führt in-

folgedessen nur zu geringen Steigerungen der Deckungsrate in den Sommermonaten. In den Wintermonaten hingegen ist die erzeugte Solarenergie zu gering, um den Strom- und Wärmebedarf zu decken. Überschüssige Solarenergie, die in den Speichersystemen gespeichert werden könnte, fällt in den Wintermonaten hingegen nur in geringem Umfang an. In diesem Zusammenhang führen die Verringerung der thermischen Speicherkapazität und der Verzicht von elektrischen Speichersystemen in Variante 1 nur zu einem geringen Absinken der Deckungsrate auf 16,7 %.

Ebenfalls geringe Veränderungen ergeben sich durch die veränderten klimatischen Verhältnisse. So sinkt in beiden Varianten „extremer Sommer“ und „extremer Winter“ die Deckungsrate. Zwar steigt in beiden Fällen ebenfalls das Potenzial regenerativer Energien an (Jahresbilanz), doch resultiert hierdurch sogar ein verringerter lastgerechter Beitrag regenerativer Energien.

7 Auswertung und Interpretation

Der Klimaschutz und die Begrenzung des voranschreitenden anthropogenen Klimawandels sind eine der größten Herausforderungen des 21. Jahrhunderts. Durch die Ratifizierung des Kyoto-Abkommens und des darauffolgenden Pariser Klimaschutzabkommens wurden Vereinbarungen zur Reduzierung der anthropogenen Treibhausgase völkerrechtlich festgelegt. Die Bundesrepublik Deutschland hat sich in diesem Kontext dazu verpflichtet den Ausstoß umweltschädlicher Treibhausgase bis 2050 um 80-95 % zu verringern.

Zur Erreichung der gesteckten Klimaziele ist eine Abkehr von fossilen Energien, inkl. Kernenergie, und ein Umstieg auf regenerative Energien unerlässlich. Ausgelöst durch die verheerende Katastrophe in Fukushima (Japan) 2011, hat die Bundesregierung den Ausstieg aus der Kernenergie bis 2022 beschlossen. Um die bis 2050 gesteckten Klimaziele zu erreichen hat die „Kohlekommission“ Anfang 2019 einen Bericht vorgelegt, in dem empfohlen wird, bis spätestens 2038 aus der Kohleverstromung auszusteigen (Kommission "Wachstum, Strukturwandel und Beschäftigung" 2019). Neben der Abkehr von den fossilen Energien ist die Reduktion des Energieverbrauchs und der Ausbau der regenerativen Energien von entscheidender Bedeutung. Vorliegende Untersuchungen zeigen jedoch, dass der Ausbau der regenerativen Energien in den letzten Jahren ins Stocken geraten ist. So bewegt sich z. B. der Anteil der regenerativen Energien am Endenergieverbrauch für Wärme und Kälte seit 2010 zwischen 12-14 % (BMW i [Hrsg.] 2018). Bis zum Eintritt der Corona-Pandemie (Anfang März in Deutschland) war klar, dass Deutschland die sich bis 2020 gesteckten Klimaschutzziele verfehlen wird (Kemfert, C. *et al.* 2018, BMU 2019). Als Folge des „Shutdowns“, ausgelöst durch die Corona-Pandemie, großer Teile des öffentlichen Lebens und der gewerblichen sowie industriellen Tätigkeit werden die gesteckten Klimaschutzziele Deutschlands voraussichtlich für 2020 doch erreicht (Agora Energiewende *et al.* 2020).

Um die gesteckten Ziele bis 2030 und 2050 zu erreichen müssen die, in den letzten Jahren etwas ins Stocken geratenen Anstrengungen wieder intensiviert werden. Insbesondere die Maßnahmen zur Verringerung des Energieverbrauchs und der Ausbau der regenerativen Energien müssen verstärkt werden. In beiden Fällen kommt den Kommunen eine zentrale Rolle zu, findet ein Großteil des Energieverbrauchs und Ausstoß von Treibhausgasen doch in eben jenen Kommunen statt. Bestrebungen der Kommunen in den letzten Jahren (vgl. Kapitel 2.1) belegen, dass die Kommunen ihre Bedeutung für die Transformation erkannt haben. So ist die Anzahl der Kommunen, die Konzepte für eine lokale Energieautarkie oder 100 % Energieversorgung ausgerufen haben, in den letzten Jahren stark gestiegen. Im Rahmen der Klimaschutzinitiative wurden bis dato eine Vielzahl an Energie- und Klimaschutzkonzepten erarbeitet, die den Kommunen grundsätzlich ein hohes Potenzial regenerativer Energien attestieren. Nicht selten wird so bilanziell bei den

Kommunen ein Potenzial für eine 100 % regenerative Eigenversorgung identifiziert, sollten alle regenerativen Energiepotenziale erschlossen und effizienzsteigernden bzw. energiesparenden Maßnahmen umgesetzt werden. Mit Ausnahmen kleinerer Gemeinden wie z. B. Jühnde und Felsheim, konnte bisher jedoch keine Kommune einen hohen Versorgungsgrad mit regenerativen Energien erreichen. Insbesondere im Wärmebereich sind die Kommunen noch weit entfernt von einem hohen Anteil regenerativer Energien. Darüber hinaus raten Studien dazu, das Ziel einer lokalen autarken regenerativen Energieversorgung von Städten und Gemeinden kritisch zu hinterfragen, da hiermit insbesondere Fragen bezüglich der Versorgungssicherheit, der technischen Realisierung und Investitionen einhergehen. Nichtsdestotrotz bleibt das Ziel einer möglichst hohen regenerativen Energieversorgung bestehen. Bilanziell, so die Mehrheit der kommunalen Energie- und Klimaschutzkonzepte, könnten sich die Städte und Gemeinden in Deutschland weitestgehend selbst versorgen (vgl. Genske, D. D. *et al.* 2009). Hierbei unberücksichtigt bleibt jedoch i. d. R. die saisonale und kurzzeitige Volatilität des regenerativen Energieangebots, insbesondere von PV, Solarthermie und Wind. Dies aber wirft die Frage nach den tatsächlich erzielbaren regenerativen Energiepotenzialen auf, die unter Berücksichtigung eben jenes volatilen Charakters der regenerativen Energien und der schwankenden Energienachfrage möglich sind. Was bedeutet also ein bilanzielles regeneratives Energiepotenzial unter Berücksichtigung einer stündlichen Modellierung? Aus diesem Anlass wurde in der vorliegenden Arbeit für ein Fallbeispiel das regenerative Energiepotenzial für ein Jahr ermittelt. Im Weiteren wurde hierauf aufbauend das lastgerechte regenerative Energiepotenzial modelliert. Hieraus lassen sich Rückschlüsse zum möglichen Grad einer Eigenversorgung für das Fallbeispiel erlangen.

7.1 Beitrag regenerativer Energien zur Energieversorgung

Eigenversorgung mit regenerativen Energien in der Jahresbilanz und lastgerechten Modellierung

Wie aus den Berechnungen hervorgeht, steht dem Fallbeispiel ein regeneratives Energiepotenzial (Jahresbilanz) in Höhe von 58 GWh für Strom und 104 GWh für Wärme zur Verfügung. Durch dieses regenerative Energieangebot könnten rund 96 % des Strombedarfs und rund 37 % des Wärmebedarfs gedeckt werden. Der Gesamtdeckungsgrad für den Anwendungsfall beträgt somit rund 47 %. Vergleichbare Potenziale und Deckungsgrade wurden in einer Vielzahl kommunaler Klima- und Energiekonzepte ermittelt. Hierbei unberücksichtigt bleiben jedoch mehrheitlich der volatile Charakter der regenerativen Energien und der antizyklische Verlauf der Energienachfrage sowie des Energieangebots. Infolgedessen ist von einem wesentlich geringen Deckungsgrad auszugehen.

So kommt die vorliegende Untersuchung, auf Basis einer lastgerechten Modellierung des Energiebedarfs und des regenerativen Energieangebots, zu dem Ergebnis, dass das in der Jahresbilanz ermittelte regenerative Energiepotenzial etwa um den Faktor 3 größer

ausfällt als das lastgerecht modellierte Potenzial. Hierdurch steht dem Fallbeispiel, unter Berücksichtigung stündlicher Modellierungen, lediglich ein regeneratives Energiepotenzial von insgesamt 59 GWh zur Verfügung. Dieses teilt sich in 26 GWh Strom und 34 GWh Wärme auf. Somit können von dem Potenzial der Jahresbilanz lediglich rund 30 % für die Deckung der Energienachfrage genutzt werden. Die verbleibenden, rund 70 % des Energiepotenzials könnten folglich nicht für die Deckung der lokalen Energienachfrage genutzt werden. Der überschüssige Strom könnte zwar in das öffentliche Stromnetz eingespeist und an anderer Stelle genutzt werden, große Teile der anfallenden Wärme blieben jedoch ungenutzt. Doch auch der überschüssige Strom kann zukünftig ungenutzt bleiben. Sollten z. B. in der Zukunft eine Vielzahl an Gemeinden größere Überschüsse an Strom erzeugen, dann könnten die Abnehmer knapp werden und so der überschüssige Strom ebenfalls ungenutzt bleiben. Alternative Nutzungskonzepte, wie z. B. die Wasserstoffherzeugung aus Strom, könnten vereinzelt eine Lösung bieten. Hier gilt es jedoch noch eingehender die Wasserstoffherzeugung und dessen potenzielle Nutzung zu untersuchen.

Betrachtet man die Bereiche Strom und Wärme separat, dann ergeben sich für den Bereich Strom eine Überschätzung von rund 2,4 und für Wärme rund 3,1. Die geringere Differenz beim Deckungsgrad von Strom resultiert aus dem gleichmäßigeren Verlauf des Strombedarfs über das gesamte Jahr. Im Bereich Wärme schlägt sich hingegen in stärkerem Maße der antizyklische Verlauf von Angebot und Nachfrage nieder, was dem hohen Anteil solarer Wärmebereitstellung in der Untersuchung geschuldet ist. Werden weitere regenerative Wärmequellen (z. B. Erdwärme) zur Wärmebereitstellung einbezogen, ist von einer Verringerung der Differenz, zwischen dem Deckungsgrad der Jahresbilanz und der stündlichen Modellierung, auszugehen. Der Deckungsgrad wird somit in erheblichem Maße durch die Fähigkeit zur Bereitstellung regenerativer Energien zum Zeitpunkt der Nachfrage und dem regenerativen Energiemix beeinflusst.

Dies führt insgesamt zu der Schlussfolgerung, dass die nutzbaren Potenziale auf Basis von Jahresbilanzen systematisch überschätzt werden und zu Fehlannahmen und hierauf aufbauende Entscheidungen führen. Zugespitzt könnte man auch den Vorwurf anführen, dass wir uns mit Jahresbilanzverfahren die Potenziale schön rechnen. Zieht man hingegen stündliche Lastmodellierungen der Energienachfrage und des Energieangebots mit ein, dann kann aufgezeigt werden, welche regenerativen Energiequellen bzw. Systeme für eine regenerativen Eigenversorgung grundsätzlich in Frage kommen bzw. bei kommenden Planungen zu berücksichtigen und möglicherweise zu bevorzugen wären. Die Einbeziehung von stündlichen Modellierungen zum Energiebedarf und Angebot kann somit als Grundlage für erste Diskussion und weiterführende Planungen einer Kommune dienen. Es soll jedoch auch hier darauf verwiesen werden, dass selbst bei einer Modellierung mit stündlicher Auflösung letztendlich die Potenziale überschätzt werden können. Vielfache Annahmen zum Gebäudebestand, technologische Aspekte (Wirkungsgrade,

Wärmeverluste, usw.) sowie vereinfachte Berechnungsverfahren können im ungünstigsten Fall nochmals das Potenzial verringern.

Ergebnisse aus den Sensitivitätsanalysen

Neben der Basisvariante des Fallbeispiels wurden zur Einordnung der Ergebnisse und zur Abschätzung des Berechnungsverfahrens Sensitivitätsstudien (vgl. Kapitel 6.5) durchgeführt. Durch die Variation ausgewählter Parameter wurde geprüft, wie stark die jeweiligen Parameter und damit auch die getroffenen Annahmen das Potenzial regenerativer Energien, den Energiebedarf und den Grad der Eigenversorgung beeinflussen. Zentrale Bedeutung nimmt der bereits zuvor beschriebene zeitliche Verlauf von Energienachfrage und regenerativem Energieangebot ein. In den Sensitivitätsanalysen hat sich gezeigt, dass die nutzbaren Flächen für die Bereitstellung regenerativer Energien, die Art der regenerativen Energiequelle und der Energiebedarf Einfluss auf den Grad der regenerativen Eigenversorgung nehmen. Eine zentrale Bedeutung kommt darüber hinaus dem Heizenergiebedarf zu. So zeigen die Sensitivitätsanalysen, dass eine Reduzierung des Heizenergiebedarfs, trotz gleichbleibendem Beitrag regenerativer Energien, zu den höchsten Deckungsraten führt. Die Reduktion des elektrischen und thermischen Energiebedarfs ist somit ein zentrales Element bei der Erreichung einer regenerativen Energieversorgung.

Das Angebot energetisch nutzbarer Flächen innerhalb der Bebauung beeinflusst in hohem Maße die Energiebereitstellung aus regenerativen Energiequellen. Bei den in der vorliegenden Arbeit betrachteten Flächen handelt es sich um Dachflächen, die für die Bereitstellung solarer Energie genutzt werden sowie um Grünflächen, die organische Reststoffe liefern. Während solarenergetische Systeme von den verfügbaren Dachflächen und damit von der Bebauung profitieren, wird im Fallbeispiel rund 70 % der organischen Rest- und Abfallstoffe durch das Angebot an Grünflächen beeinflusst. Infolgedessen wird die energetische Nutzung solarer Strahlung nur in geringem Umfang durch eine zunehmende Verdichtung und Überbauung beeinflusst. Das Potenzial der organischen Rest- und Abfallstoffe hingegen wird durch eine steigende Überbauung in erheblichem Maße beeinflusst. Der Anteil der Lebensmittelabfälle der privaten Haushalte wird hingegen nicht unmittelbar durch die veränderte bauliche Dichte beeinflusst.

Mit Blick auf weitere regenerative Energiequellen bzw. Energiesysteme, insbesondere der energetischen Nutzung der Erdwärme, kommt der Flächenverfügbarkeit und der baulichen Dichte ein hoher Stellenwert zu. Die Untersuchungen haben dahingehend gezeigt, dass durch eine sinkende durchschnittliche Geschossigkeit der Bebauung, bei sonst gleichbleibenden Rahmendaten, qualitative Potenziale verringert werden. D. h., dass der Beitrag von Biomasse, die flexibel zur Energieversorgung eingesetzt werden könnte, reduziert wird. Entscheidender jedoch ist hierdurch die erhöhte solarenergetisch nutzbare Fläche und die zusätzliche erzielbare solare Energie (Strom und Wärme). Die zusätzliche

solare Energie führt zu einem weiteren Anstieg des sommerlichen Energieüberschusses und kann folglich nur in geringem Umfang zu einer weiteren regenerativen Energieversorgung der Gemeinde beitragen. Hierdurch zeigt sich, dass die Art der regenerativen Energie, insbesondere deren Speicherbarkeit und saisonales Angebot, hohe Bedeutung bei der regenerativen Energieversorgung einnimmt. Eine Verlagerung von Frei- und Grünflächen, zu Gunsten einer Verdichtung hin zu einer kompakten Stadt ist somit aus energetischen, aber auch gesellschaftlichen, sozialen und gesundheitlichen Aspekten kritisch zu hinterfragen.

Ein vergleichsweise geringer Beitrag konnte im Rahmen der Sensitivitätsanalysen durch die Energiespeicher festgestellt werden. Hier zeigt sich der ausgeprägte antizyklische Verlauf zwischen Solarenergie und Heizwärmebedarf. Infolgedessen können in den Sommermonaten für die elektrischen und thermischen Speicher zwar hohe Ladezustände erreicht werden, ein Großteil der Energie kann jedoch nicht für die Eigenversorgung genutzt werden. In den Wintermonaten können die Speicher meist nur unzureichend beladen werden, da die zur Verfügung stehende Energie bereits mehrheitlich direkt für die Raumheizung oder die Bereitstellung von Strom und Warmwasser genutzt wird. Hierdurch können die Speicher in den Wintermonaten nur in sehr geringem Maße zur Energiebereitstellung beitragen. Neben der zuvor aufgezeigten Reduzierung des Heizwärmebedarfs könnte durch den Einsatz von Langzeitwärmespeichern in Kombination mit solaren Nahwärmenetzen der Beitrag solarer Wärme in der Heizperiode erhöht werden. Während dies für Neubaugebiete eine denkbare Option darstellt, ist ein nachträglicher Aufbau eines Nahwärmenetzes mit saisonalem Wärmespeicher im Bestand mit erheblichen Herausforderungen und Investitionen verbunden (Böhnisch, H. 2001, Böhnisch, H. *et al.* 2006) und eingehend zu Prüfen.

Das Potenzial regenerativer Energien für die Energieversorgung Privater Haushalte

Aufbauend auf den zuvor dargelegten Berechnungen und Untersuchungen, kann für die eingangs aufgeworfene Forschungsfrage „Welches Potenzial besitzen Solarenergie und die energetische Nutzung von Reststoffen zur Energieversorgung der Privaten Haushalte unter hochaufgelösten Zeitreihenbetrachtungen?“ festgehalten werden, dass sich das Potenzial von Solarenergie und der energetischen Nutzung organischer Reststoffe zur Energieversorgung Privater Haushalte unter hochaufgelösten Zeitreihenbetrachtungen zwischen 15 % und 20 % bewegt. D. h., dass im vorliegenden Fallbeispiel zwischen 15 % und 20 % der Energienachfrage durch regenerative Energien gedeckt werden kann. Gegenüber einer Jahresbilanz liegt das Potenzial der stündlichen Modellierung somit um den Faktor 3 niedriger. Bezugnehmend auf die Forschungsfrage „Welche Parameter beeinflussen das Potenzial regenerativer Energien, den Bedarf an Energie und damit den Grad der Eigenversorgung einer Gemeinde?“, konnte durch die Sensitivitätsanalyse den Parametern „bauliche Dichte“ und „Gebäudeenergieeffizienz“ ein bedeutender Einfluss

nachgewiesen werden. So wird durch eine reduzierte Grundflächendichte in Folge einer Bauweise mit einer höheren Anzahl an Vollgeschossen, mit 15,4 %, der niedrigste Deckungsbeitrag durch regenerative Energien festgestellt werde. Auch die erhöhte Grundflächendichte, mit einer reduzierten Anzahl an Vollgeschossen bei den Gebäudevertretern, beeinflusst das Potenzial der regenerativen Energien im positiven Sinne erheblich und führt zu einer Steigerung um etwa 11 % des Deckungsbeitrags von 17,2 % auf 19,1 %. Einen noch stärkeren Einfluss hat die verbesserte Gebäudeenergieeffizienz, die bei einem reduzierten Heizwärmebedarf von 20 % zu einer Steigerung des Deckungsbeitrags um rund 17 % führt. Ebenfalls gezeigt hat sich im Rahmen der Arbeit, dass die These, dass eine stündliche Modellierung gegenüber einer Jahresbilanz zu erheblichen Unterschieden bei der Potenzialausweisung führt.

7.2 Das Verfahren – Umsetzung, Grenzen und Übertragbarkeit

Verfahrensumsetzung

Das im Rahmen der Arbeit erarbeitete Berechnungsverfahren bildet die Grundlage für die Berechnungen des Energiebedarfs und des regenerativen Energiepotenzials. Bestandteil des Berechnungsverfahrens sind die Modelle zur Berechnung des Energiebedarfs und des regenerativen Energieangebots, das Speichermodell sowie das Siedlungsmodell. Letztgenanntes bildet hierbei das Rückgrat des Berechnungsverfahrens. So liefert das Siedlungsmodell die notwendigen Informationen für die Berechnungen des Energiebedarfs und des regenerativen Energieangebots. Für die Umsetzung des Verfahrens wurde das Tabellenkalkulationsprogramm Excel von Microsoft ausgewählt. Für Excel spricht der leichte Einstieg, dessen hohe Flexibilität und die weite Verbreitung der Software. So werden insbesondere Einstiegshürden z. B. in Form von spezifischen Programmiersprachen und erforderlicher Software (Mathlab, TranSys, usw.) reduziert. Änderungen oder Anpassungen ausgewählter Parameter sind zudem, aufgrund spezifischer Kenntnisse zum Modell oder einer Black-Box-Struktur oft nur bedingt anpassbar bzw. mit Hürden verbunden.

Darüber hinaus werden eine Vielzahl der relevanten Daten im Excel-Format oder Excel lesbaren (.csv) Formaten u. a. durch die statistischen Ämter bereitgestellt. Zudem bietet das Tabellenkalkulationsprogramm Excel, aufgrund der hohen Verbreitung, die Möglichkeit eine Vielzahl potenzieller Nutzer/in (z. B. kommunale Umweltbehörden, Planer, usw.) zu erreichen, diesen hierdurch den Zugang zu erleichtern und einen Austausch mit ihnen zu ermöglichen. Ein weiterer Vorteil, der mit der Umsetzung in Excel verbunden ist, ist die einfache Erweiterung um weitere Anwendungen und Themenbereiche.

Während der Erarbeitung des Verfahrens in Excel haben sich aber auch Grenzen gezeigt. Insbesondere die Verknüpfung der einzelnen Modelle und Berechnungsschritte sind umständlich und häufig nur über Zwischenschritte möglich. So führen die komplexen Berechnungsfunktionen und die große Datenmenge, bedingt durch die stündliche Model-

lierung, zu erheblichen Rechenzeiten und zu einer Verringerung der Systemstabilität. Nur durch eine Aufteilung in mehrere Excel-Dateien und Berechnungsblätter sowie deren separate Anwendung war es daher möglich die Rechenzeit und die Stabilität des Systems zu verbessern. Im Gegenzug wurden hierdurch jedoch die Handhabung und Übersichtlichkeit verschlechtert. Infolgedessen ist es notwendig zwischen den verschiedenen Dateien und Datenblättern hin und herzuspringen. Hier gilt es zu prüfen welche Optimierungspotenziale sich durch eine verstärkte Nutzung des VBA-Codes sowie von Datenbanken und implementierten Excel-Tools für die Umsetzung und Anwendung erschließen ließen.

Abgrenzung des Untersuchungsrahmens

Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wurden die solarenergetischen Potenziale sowie die energetischen Potenziale organischer Reststoffe der privaten Haushalte untersucht. Die Berücksichtigung der Solarenergie im Berechnungsverfahren beruht auf dem hohen Potenzial im bebauten Raum, der geringen Flächennutzungskonkurrenz und der hohen Akzeptanz durch die Bevölkerung. Zudem ist zukünftig von einer zunehmenden Bedeutung der Solarenergie in einem regenerativen Energiesystem zu erwarten. Des Weiteren konnte anhand des volatilen Charakters der Solarenergie in besonderem Maße die Diskrepanz zwischen Jahresbilanz und lastgerechter Modellierung aufgezeigt werden. Demgegenüber zeichnet die energetische Nutzung organischer Reststoffe eine hohe Flexibilität und Speicherbarkeit aus, die es ermöglicht Energie dann bereitzustellen, wenn diese nachgefragt wird. Darüber hinaus wurde durch beide Energiequellen das Spannungsgefüge zwischen Flächenangebot, baulicher Dichte und Energieangebot aufgezeigt, welches im kommunalen Kontext eine gewisse Relevanz besitzt.

Als Anwendungsfall diente der Wohngebäudebestand mit den privaten Haushalten und dem einhergehenden Energiebedarf. Private Haushalte und Wohngebäudebestand sind im nationalen Durchschnitt für rund 30 % des Energiebedarfs verantwortlich. Auf kommunaler Ebene jedoch kann dieser Wert stark variieren. Die Bedeutung des Energiebedarfs der privaten Haushalte und des Wohngebäudebestands steigt i. d. R. mit sinkender Bevölkerungszahl der Kommune. Aufgrund der großen Anzahl an Kommunen mit 50.000 und weniger Einwohnern nehmen der Wohngebäudebestand und deren Bewohner/innen eine zentrale Rolle ein. Dahingehend wurde auch das Fallbeispiel ausgewählt. Darüber hinaus bildet die Verfügbarkeit von Informationen zum Untersuchungsgegenstand regelmäßig eine Schwachstelle für Modellierungen. Demgegenüber ermöglicht die hohe Verfügbarkeit von Informationen zum Gebäudebestand und den privaten Haushalten einen breiten Einsatz des Verfahrens und erlaubt weiterhin die Berechnung der regenerativen Energieversorgung unter gleichen Rahmenbedingungen.

Die im Rahmen der Arbeit adressierte Betrachtung auf kommunaler Ebene erlaubt eine Abschätzung der regenerativen Energieversorgung in kurzer Zeit. Darüber hinaus bietet

das erarbeitete Siedlungsmodell auch die Möglichkeit Analysen für kleinere Untersuchungsräume, z. B. auf der Blockebene, durchzuführen. Zentrale Bedeutung kommt hierbei den verwendeten Lastprofilen zu. Hierzu sind jedoch u. a. Anpassungen bei den zugrunde liegenden Lastprofilen vorzunehmen. So eignen sich die verwendeten Standardlastprofile nur für größere Untersuchungsräume mit 1000 und mehr Haushalten. Werden hingegen Untersuchungsräume mit weniger Haushalten betrachtet, dann ist mit größeren Abweichungen im Vergleich zu den Standardlastprofilen zu rechnen. So ist der Lastverlauf stärker durch Unregelmäßigkeiten (z. B. Lastspitzen) geprägt. Dies gilt es, durch eine Anpassung der elektrischen und thermischen Lastprofile, bei der Analyse kleinerer Untersuchungsräume zu berücksichtigen. Hierfür kann z. B. auf das Tool von Pflugradt (Pflugradt, N. D. 2016, Pflugradt, N. & Muntwyler, U. 2017) zurückgegriffen werden, mit dessen Hilfe Lastprofile für Haushalte erzeugt werden können.

Das Siedlungsmodell

Dem im Rahmen des Berechnungsverfahrens erarbeiteten Siedlungsmodell kommt eine zentrale Bedeutung bei der Ermittlung des Potenzials zur lokalen regenerativen Energieversorgung zu. Trotz vergleichsweise geringer Anforderungen an die benötigten Daten und unter vergleichsweise geringem Aufwand ist es mittels des Siedlungsmodells möglich Berechnungen zum Energiebedarf und zum regenerativen Energiepotenzial durchzuführen. So werden mit Hilfe des Siedlungsmodells die bestehenden amtlichen Daten zum Gebäudebestand um zusätzliche Informationen ergänzt. Grundlage bilden der Strukturtypenansatz und das Geometriemodell der Gebäudevertreter. Mit Hilfe des Strukturtypenansatzes und des Geometriemodelles werden strukturelle und morphologische Informationen über den Gebäudebestand zusammenführt und hierauf aufbauend Informationen für teil- und gesamtstädtische Analysen bereitstellt. Aufgrund der mittleren Aggregationsebene des Strukturtypenansatzes kann zum einen die Komplexität des Untersuchungsgegenstands/-raums verringert werden, ohne zu stark zu aggregieren. Durch den Einsatz von statistischen Daten zum lokalen Gebäudebestand und der lokalen Bevölkerung werden lokale Gegebenheiten in den Berechnungen berücksichtigt.

Der Einsatz von Geometriemodell und Strukturtypenansatz bietet eine hohe Flexibilität bei der Modellierung des Bauwerksbestands, wodurch die Möglichkeit besteht unterschiedliche Betrachtungs- und Analyseebenen zu adressieren. Weiterhin ist es mit vergleichsweise geringem Aufwand möglich die Berechnungen auch für andere Gemeinden durchzuführen. Durch die hier geleisteten Vorarbeiten, sind hierzu lediglich Informationen zum Wohngebäudebestand der statistischen Ämter erforderlich, die flächendeckend zur Verfügung stehen. Durch die manuelle Setzung von vordefinierten Parametern können lokale Gegebenheiten bei der Berechnung berücksichtigt werden. Es besteht aber auch die Möglichkeit vordefinierte Parameter durch eigene Setzungen zu ersetzen. Insgesamt kann durch eine spielerische und iterative Herangehensweise der Einfluss unterschiedli-

cher Parameter untersucht werden. Unsicherheiten aufgrund von fehlenden bzw. lückenhaften Daten zum Gebäudebestand lassen sich somit in Form von Bandbreiten und Sensitivitäten ausloten.

Grenzen sind dem Siedlungsmodell beispielsweise durch fehlende oder nicht verfügbare Daten gesetzt. Hervorzuheben sind z. B. Informationen zu Dachneigung und Ausrichtung sowie zur Geometrie der Gebäudevertreter und der baulichen Dichte. Trotz der zunehmenden Digitalisierung und Erhebung von Daten konnte festgestellt werden, dass z. B. 3D-Gebäude- und Landschaftsmodelle bisher vorrangig nur punktuell und nicht flächendeckend verfügbar sind. Während insbesondere Metropolen wie Berlin, Hamburg und München über ein großes Angebot an Daten verfügen ist die Datenlage für Klein- und Mittelstädte hingegen bisher nur gering ausgeprägt.

Im Rahmen der Untersuchung hat sich darüber hinaus eine hohe Bedeutung von Informationen zur räumlichen Lage der Gebäudevertreter und zu den Lagebeziehungen der Strukturtypen gezeigt, auch wenn dies nicht explizit im Modell berücksichtigt wurde. Perspektivisch kann aufgrund fehlender Daten, somit die reale Bausituation sowie die Lagebeziehungen nur über theoriegeleitete Ansätze (Zeilenbebauung, Reihenhausbebauung) berücksichtigt werden. Informationen zur räumlichen Verortung sowie die Lagebeziehung der Gebäudevertreter innerhalb der Strukturtypen nehmen für die Bestimmung von Abwärmepotenzialen und deren Nutzung sowie für den Betrieb von Nahwärmenetzen eine zentrale Bedeutung ein. Für weitere Untersuchungen mit dem vorgestellten Berechnungsansatz ist die Einbeziehung von räumlichen Informationen und Lagebeziehungen anzustreben. Für die zu Beginn formulierte Forschungsfrage „Welche Daten sind auf regionaler und lokaler Ebene für Potenzialabschätzungen verfügbar?“ kann nur teilweise eine Antwort gegeben werden. So sind die Datensätze bzw. Datenbanken, die einheitliche Daten für alle Gemeinden in Deutschland enthalten und frei zugänglich sind fast ausschließlich auf die Daten und Datenbanken der Statistischen Ämter begrenzt. Die Daten zu den Gemeinden auf Länderebene besitzen jedoch häufig unterschiedliche Zeitstände, wurden unterschiedlich erhoben oder liegen in unterschiedlichem Detaillierungsgrad und unterschiedlicher Struktur vor. Datensätze, aus z. B. OpenStreetMap können eine hilfreiche Informationsquelle darstellen, müssen jedoch separat erhoben und aufbereitet werden. Daten zu den Wetterbedingungen hingegen liegen durch den Deutschen Wetterdienst deutschlandweit vor und sind bis zu einem gewissen Maß frei zugänglich. Mit Blick auf die Parameter, die als erhebliche Einflussfaktoren identifiziert werden konnten, zeigt sich, dass gerade Informationen zur baulichen Dichte aber auch insgesamt zur Bauweise und Struktur des Gebäudebestands nur sehr wenige Informationen für die Gemeinden, geschweige denn flächendeckend für Deutschland vorliegen. Auch Informationen zur Gebäudeenergieeffizienz liegen i. d. R. nur punktuell, für unterschiedliche Zeitschnitte und in unterschiedlicher Qualität vor. Dabei hat sich gezeigt, dass gerade die Gebäudeenergieeffizienz erheblichen Einfluss auf den Deckungsbeitrag besitzt.

Modellierung des Strom-, Warmwasser- und Heizwärmebedarfs

Die in der vorliegenden Arbeit verwendeten Methoden zur Modellierung von Strom, Warmwasser und Heizwärme ermöglichen die Gegenüberstellung von Energiebedarf und regenerativem Energieangebot. Erst durch die Modellierung von Energiebedarf und Energieangebot in hoher zeitlicher Auflösung können die antizyklischen Verläufe angemessen berücksichtigt werden. Auch die Integration von Energiespeichersystemen in die Modellierung erfordert setzt eine höhere zeitliche Auflösung voraus.

Für die Modellierung von Strom wurde das Standardlastprofil für Strom des BDEW, für Heizwärme das Standardlastprofil für Gas nach Hellwig und für Warmwasser das Verfahren gemäß VDI 6002 angewendet. Bei allen drei Verfahren handelt es sich um etablierte Methoden zur Modellierung elektrischer und thermischer Lasten. Mit ihrer Hilfe können die Verläufe für Strom, Warmwasser und Heizwärme in angemessener Qualität für eine größere Anzahl von Haushalten bzw. Objekte wiedergegeben werden. In Anbetracht der hier untersuchten Bezugsebene, einer gesamten Kommune, liefern die verwendeten Ansätze eine angemessene Abstraktionsebene.

Sollen jedoch hingegen kleinere Bezugsräume untersucht werden, sind die Anwendung der Standardlastprofile und der Ansatz in der VDI 6002 infrage zu stellen. So wurden insbesondere die Standardlastprofile für eine größere, nicht näher genannte, Anzahl an Haushalten erarbeitet. Infolgedessen werden Lastspitzen nur unzureichend abgebildet. Alternative Lastprofile, wie z. B. von Tjaden, T. *et al.* (2015), bilden hingegen das andere Extrem. In diesem Fall wird lediglich das Lastprofil eines einzelnen Haushalts aufgezeigt. Der Einsatz eines einzelnen Lastprofils für die Modellierung übergeordneter Größenordnungen führt demgegenüber zu einer Überschätzung der Lastspitzen und einer Unterschätzung in den Schwachlastphasen. Insgesamt hat sich gezeigt, dass mehrere Methoden, insbesondere für Strom, zur Modellierung des zeitlichen Lastverlaufs vorliegen. Problematisch ist jedoch, dass bisher keine der Methoden explizit die Ebene zwischen einzelnen Haushalten und ganzen Gemeinden bzw. Regionen vorliegen bzw. dem Autor nicht bekannt sind. Aufgrund der zunehmenden Bedeutung des Baublocks als „energetische“ Bezugsebene müssen im Rahmen weiterer Forschung Lastprofile für eben diese Ebene geschaffen werden.

7.3 Zukünftige Aufgaben und weitere Forschungsfelder

Im Rahmen der vorliegenden Arbeit konnte gezeigt werden, dass das regenerative Energiepotenzial auf Jahresbasis um den Faktor drei größer ist als das nutzbare regenerative Energiepotenzial auf Basis stündlicher Modellierungen. Die Untersuchungen lassen dahingehend den Schluss zu, dass die regenerativen Energiepotenziale auf Jahresbasis einer systematischen Überschätzung unterliegen. Hier stellt sich die Frage, ob wir uns die Potenziale möglicherweise zu „schön“ rechnen. Die Gefahr, die hieraus resultiert, ist die,

dass mögliche Potenziale die augenscheinlich identifiziert wurden letztendlich gar nicht zur Verfügung stehen oder nur in stark verringertem Umfang. Entwicklungspfade die, möglicherweise auf entsprechenden Potenzialen aufgesetzt und entwickelt wurden, lassen sich infolgedessen nicht umsetzen bzw. erreichen. Entscheidend hierbei sind auch die regenerativen Energiequellen und deren Anwendungsgebiete, die erheblichen Einfluss auf die „realistischeren Potenziale“ besitzen und infolgedessen auch die Höhe der Überschätzung beeinflussen.

Demgegenüber wurden durch die Untersuchung und die Erarbeitung des Verfahrens weitere Forschungsfragen und Wissensdefizite aufgezeigt. Hierzu gehören z. B. die Verfügbarkeit und Qualität von Daten auf regionaler bzw. kommunaler Ebene zum Gebäudebestand, regionaler Energieverbräuche und Lastgänge für die privaten Haushalte und den Gewerbe- und Industriesektor. Darüber hinaus sollte das Verfahren angepasst sowie um weitere Bestandteile ergänzt werden. Dies umfasst insbesondere die Einbindung weiterer regenerativer Energiequellen und die Sektoren Gewerbe und Industrie sowie öffentliche Einrichtungen im Verfahren aber auch die Erweiterung um ökonomische und soziale Fragestellungen.

Einbeziehung weiterer regenerativer Energiequellen

Mit Solarenergie und der energetischen Nutzung organischer Reststoffe wurden zwei regenerative Energieformen beleuchtet, die sich durch spezifische Charakteristika auszeichnen. Während sich die Solarenergie durch ein hohes Potenzial, geringe Flächennutzungskonkurrenz aber auch hoher Volatilität auszeichnet, besitzt die energetische Nutzung organischer Reststoffe ein vergleichsweise geringes Potenzial, demgegenüber aber die Fähigkeit zur leichteren Speicherbarkeit und damit die Fähigkeit zur flexiblen Energiebereitstellung. Solar- und Bioenergie tragen in der Fallstudie bereits zu einer regenerativen Energieversorgung von rund 15-20 % bei. Die hier beleuchteten regenerativen Energiequellen (Solar- und Bioenergie) stellen somit lediglich eine erste Auswahl verfügbarer regenerativen Energiequellen dar, die für die Energieversorgung einer Kommune bzw. eines Stadtteils eingesetzt werden können. Darauf aufbauend leitet sich für die weitere Forschung bzw. Weiterentwicklung des verwendeten Ansatzes die Aufgabe ab, weitere regenerative Energiequellen bei der Potenzialabschätzung und insbesondere der Modellierung zu integrieren. Aufgrund des hohen Wärmebedarfs des Wohngebäudebestands sollten dahingehend insbesondere regenerative Energiequellen adressiert werden, die zur Bereitstellung von Wärme genutzt werden können. Dies z. B. umfasst die oberflächennahe Erdwärme und die Nutzung der Umgebungswärme durch Luftwärmepumpen. Insbesondere durch die Beleuchtung des Potenzials von Erdwärmepumpen, das nur geringen saisonalen Schwankungen unterworfen ist, lassen sich neue Schlussfolgerungen ziehen. Es ist anzunehmen, dass aufgrund der geringeren Volatilität die Differenz zwischen Jahresbilanz und stündlicher Modellierung abnimmt.

Des Weiteren können neben den Grünflächen der Wohnbebauung auch weitere Grünflächen z. B. öffentliche und kommunale Grünflächen und straßenbegleitende Bäume, in der Untersuchung ergänzt werden. Im Bereich Strom ist die Einbindung von Windenergie im Umland denkbar. Diese ließe sich vergleichsweise einfach im Verfahren integrieren, da diese nicht mit dem Siedlungsmodell gekoppelt werden muss.

Darüber hinaus sollte die Potenzialanalyse um ökonomische und soziale Aspekte ergänzt werden. Die hier beleuchteten Potenziale adressieren derzeit ausschließlich theoretisch-technische Aspekte. Die Einbindung ökonomischer und sozialer Aspekte jedoch würden zu einer umfassenderen Einschätzung der Potenziale regenerativer Energien beitragen, da Energiepotenziale, bei der Erzeugung aber auch bei der Nachfrage, nur erschließbar sind, wenn diese aus Sicht der Akteure, z. B. der Eigenheimbesitzer oder der Immobilienbesitzer, Stadtwerke, usw., wirtschaftlich oder zumindest ökonomisch vertretbar sind, also keine allzu ungünstige Kosten-Nutzen-Relation als die bisherige Energiebereitstellung besitzen. Aus sozialer Sicht kommt insbesondere der Akzeptanz einer Transformation vom alten bzw. bestehenden Energiesystem hin zu einem neuen Energiesystem zu.

Weiterentwicklung des Verfahrensansatzes

Wie auf den vorausgegangenen Seiten gezeigt werden konnte, ermöglicht das erarbeitete Verfahren die Berechnung des regenerativen Energiepotenzials und dessen potenziellen Beitrag zur Energiedeckung der privaten Haushalte. Aus den Analysen wird insbesondere die Diskrepanz zwischen den Berechnungen auf Jahresbasis und auf Stundenbasis für den Beitrag regenerativer Energien ersichtlich. In Anbetracht der aufgezeigten Grenzen bei der Umsetzung in der Tabellenkalkulationssoftware Excel und einer Erweiterung durch weitere Anwendungsbereiche (Energiebedarf für öffentliche Einrichtungen, Gewerbe und Industrie), regenerative Energiequellen (Erdwärme, Umweltwärme, Windenergie) und einer Bereitstellung für Dritte besteht bei der Umsetzung Optimierungsbedarf. Auch wenn in der vorliegenden Arbeit nicht das Ziel in der Erstellung eines Anwendungstools für Dritte bestand, so hat sich dennoch gezeigt, dass die Benutzerfreundlichkeit gesteigert werden sollte.

Bedingt durch die großen Datenmengen und die komplexen Rechenprozesse werden an die Hardware hohe Anforderungen gestellt. Dies hat zur Folge, dass das Arbeiten mit dem Verfahren und die Berechnungen darin mit Unterbrechungen und Systeminstabilität verbunden sind. Es ist dahingehend zu prüfen, ob die komplexeren Berechnungen aus Excel ausgelagert werden können und z. B. mit R oder Python durchgeführt werden können ohne jedoch die Anschlussfähigkeit an ein gängiges Tabellenkalkulationsprogramm verloren geht, da die Schnittstelle über ein Tabellenkalkulationsprogramm die Nutzungshürde tendenziell für öffentliche Einrichtungen und Verwaltungen reduziert. Darüber hinaus ist zu prüfen wie weitere Tools, so z. B. PVGIS (JRC 2017), Geografische Informationssysteme oder Sementa ® des IÖR in das Verfahren eingebunden werden könnten.

Da die vorliegende Arbeit vorrangig eine Anwendung im ländlichen Raum sowie für kleine und mittlere Städte adressiert, sollten bei der Weiterentwicklung zwingend Vertreter/innen von Kommunen und deren Verwaltungen eingebunden werden. Hierdurch kann und soll gewährleistet werden, dass das mögliche Verfahren anschlussfähig an die Gegebenheiten ist und einen vergleichsweise leichten Zugang bietet. Dahingehend sollte ein nächster Schritt sein, konkret mit entsprechenden Vertretern und Vertreterinnen in den Austausch zu treten.

Verbesserung des Datenbestands auf regionaler und lokaler Ebene

Im Rahmen der Arbeit hat sich wiederholt gezeigt, dass trotz der zunehmenden Generierung von Daten und deren Digitalisierung weiterhin große Informationsdefizite auf regionaler Ebene bestehen. Ursachen sind neben fehlenden bzw. unzureichenden Datenbeständen insbesondere auch deren Verfügbarkeit und Kopplung. Dies trifft insbesondere auf die Datenlage zu Klein- und Mittelstädten zu. Folgende Datenbereiche sollen diesbezüglich hervorgehoben werden:

Regionale bzw. lokale Energiekennwerte bzw. Energieverbräuche der privaten Haushalte für Wärme und Strom:

- Die Datenlage zu Energiekennwerten bzw. Energieverbräuchen ist heterogen und liefert in Abhängigkeit der Region ein unterschiedliches Bild. Während in ausgewählten Regionen, insbesondere in Großstädten, im Zuge der Digitalisierung und Opendata-Bewegung mittlerweile eine Vielzahl an Daten bereitgestellt wird und frei zugänglich ist, fehlt es in Klein- und Mittelstädten an einem solchen Datenangebot. Insbesondere im Wärmebereich besteht derzeit ein Informationsdefizit. Hier könnten insbesondere lokale Stadtwerke und Netzbetreiber Informationen zum Energieverbrauch der privaten Haushalte sowie zu Gewerbe und Industrie bereitstellen. Hierzu sollte in einen Dialog mit den Stadtwerken getreten werden, in dem zu prüfen ist ob und unter welchen Rahmenbedingungen entsprechende Daten der Stadtwerke zugänglich gemacht werden könnten.
- Ergänzend bzw. alternativ zur Abfrage der Energieverbräuche bei den Stadtwerken, könnte im Wärmebereich die Analyse und Auswertung von Immobilienportalen und den darin veröffentlichten Informationen zu Energieverbrauch bzw. -bedarf der inserierten Gebäude ein interessanter Ansatz sein. So ist durch die Energieeinsparverordnung (EnEV 2013) geregelt, dass Verkäufer und Vermieter den Energieverbrauch bzw. -bedarf für das Verkaufs- bzw. Mietobjekt angeben müssen, sollte zum derzeitigen Zeitpunkt ein Energieausweis vorliegen. Erste Untersuchungen dieser Datenbestände zeigen ein grundsätzliches Potenzial zur Generierung von regionalen bzw. lokalen Wärmeverbrauchs- bzw. -bedarfskennwerten. Unklar ist in diesem Zusammenhang, wie gut die inserierten Gebäude den Wohngebäudebestand und dessen ener-

getischen Ist-Zustand wiedergeben. Die Qualität und Eignung sind dahingehend einer eingehenden Prüfung zu unterziehen.

Verbesserung der Datenlage zum Gebäudebestand, insbesondere zu Geschossigkeit, Dachneigung und -ausrichtung.

- Die Untersuchungen im Rahmen der vorliegenden Arbeit und insbesondere die Erarbeitung des Siedlungsmodells haben Datenlücken zum (Wohn-)Gebäudebestand aufgezeigt und deren Bedeutung für die Berechnung der Potenziale im Rahmen der Sensitivitätsanalysen haben darüber hinaus veranschaulicht, welchen Einfluss z. B. die Anzahl der Vollgeschosse auf die regenerativen Energiepotenziale und den Beitrag zur Energieversorgung, diese besitzen. Aber auch Informationen zu Dachform, Neigung und Ausrichtung sowie Informationen allgemein zur baulichen Dichte (GRD und GFD) sind nur punktuell verfügbar, so z. B. durch Fallstudienuntersuchungen. Informationen zur Geschossigkeit wiederum werden beispielsweise durch die statistischen Ämter für den Neubau erhoben, Informationen zum Bestand bzw. zu Gebäuden, die vor dem Jahr 2000 erbaut wurden, liegen keine systematischen Informationen vor bzw. sind nicht bekannt. Für die Modellierung des Gebäudebestands aber auch für die anschließende Berechnung des regenerativen Energiepotenzials stellen diese eine wichtige Informationsquelle dar. In einer Vielzahl von Studien und Veröffentlichungen wird zur Quantifizierung und Analyse des Gebäudebestands das Potenzial von Softwarelösungen (Geografischen Informationssystemen, objektbasierte Bildklassifizierungssysteme) und digitaler Daten (z. B. Laserscannerdaten, Landschaftsmodelle, 3D-Gebäudedaten) für gegenwärtige und zukünftige Untersuchungen angeführt. Aufgrund der bereits zuvor angeführten geringen Datenlage im ländlichen Raum und für Klein- und Mittelstädte können Konzepte, die z. B. auf Opendata-Datenbanken oder hochaufgelöste Luftbilder zurückgreifen kaum einen Mehrwert liefern sind diese i. d. R. nicht (kostenfrei) verfügbar. Vielfache Ansätze über Umwege und der Verknüpfung verschiedener Datensätze bzw. Informationsquellen können Orientierungen und Anhaltspunkte liefern jedoch sollte zukünftig angestrebt werden den Gebäudebestand detaillierter zu erfassen. Der Einsatz von Building-Information-Modelling im Kontext der Immobilienbranche ist vielversprechend, jedoch wird hierdurch auch wiederum nur der Neubau und voraussichtlich auch vornehmlich der Geschosswohnungsbau adressiert. Immobilienportale wiederum stellen ebenfalls eine interessante Informationsbasis für die Beschreibung und Analyse des Gebäudebestands dar. Problematisch hierbei ist jedoch die unterschiedliche Qualität der Daten, da diese von unterschiedlichen Akteuren mit unterschiedlichen Kenntnissen zu Gebäuden, eingetragen werden. Informationen z. B. zur Geschossigkeit der Gebäude, können je nach Verständnis und Interpretation der Akteure zu der ein und selben Immobilie stark voneinander abweichen. Letztendlich müssen diese Daten für den Einsatz einer eingehenden Qualitätskontrolle unterzogen werden, was wiederum einen erheblichen Arbeitsaufwand be-

deutet. Hier gilt es zukünftig neue Lösungen und Ansätze zu erarbeiten, wie aus diversen Quellen Informationen zum Gebäudebestand zusammengetragen werden können, die dann auch eine gewisse Datenqualität aufweisen.

Energiebedarf des industriellen und gewerblichen Sektors.

- Neben dem Energiebedarf der privaten Haushalte entfällt ein Großteil des Energiebedarfs der Kommunen auf den Sektor Gewerbe und Industrie. Je nach Gemeinde kann der Energiebedarf des Sektors Gewerbe und Industrie um einiges größer ausfallen als der Energiebedarf der privaten Haushalte. Die Bilanzierung bzw. Modellierung des gewerblichen und industriellen Energiebedarfs für einzelne Kommunen unterliegen derzeit jedoch erheblichen Unsicherheiten. So liegen für den Sektor Gewerbe und Industrie bislang vorrangig Untersuchungen auf nationaler Ebene vor, kleinräumige Analysen sind lediglich in Ausnahmefällen und punktuell vorhanden. Eine Übertragung von nationalen oder fallstudienbezogenen Untersuchungen wird zudem durch die Heterogenität gewerblicher und industrieller Gebäude und den Produktionsprozessen erschwert. Besonders interessant in diesem Zusammenhang ist die Erfassung der Wärme- und Stromprofile des Gewerbe- und Industriesektors. Da die Lastverläufe, von denen der privaten Haushalte abweichen, könnten die identifizierten regenerativen Energiepotenziale besser genutzt werden, da die Energie in Phasen nachgefragt wird in denen z. B. in erheblichem Maße solare Energie zur Verfügung steht. Darüber hinaus entsteht bei industriellen Produktionsprozessen häufig Abwärme, die wiederum für Niedertemperaturanwendungen genutzt werden kann. In diesem Zusammenhang gilt es die bestehenden Datengrundlagen weiter zu verbessern.

8 Literatur

W. Abrahamse and L. Steg (2009). "How do socio-demographic and psychological factors relate to households' direct and indirect energy use and savings?" Journal of Economic Psychology **30**(5): 711-720.

G. Achterberg (1973). Göttingen-Holtenser Berg :12 Jahre städtebauliche Entwicklung von der Stadtrandsiedlung zum verdichteten Wohngebiet. Bonn-Bad Godesberg, Bundesminister für Raumordnung, Bauwesen und Städtebau (Hrsg.).

G. Achterberg, *et al.* (1984). Preiswerte Mehrfamilienhäuser :Dokumentation der Ausschreibung. Bonn, Bundesminister für Raumordnung, Bauwesen und Städtebau (Hrsg.).

P. Adler, *et al.* (2014). Leitfaden Biogasaufbereitung und -einspeisung. Gülzow-Prüzen, Fachagentur für Nachwachsende Rohstoffe e.V. (FNR).

H. Adwiraah (2012). GIS-basierte Bioressourceninventur. In: 2. Wissenschaftskongress „Abfall- und Ressourcenwirtschaft“. DGAW e.V. Rostock.

H. Adwiraah (2015). Bioressourceninventur - Analyse von Stoffströmen zur Bestimmung urbaner Biomassepotenziale in einem Geoinformationssystem (GIS). Doktor Monographie, Technische Universität Hamburg-Harburg.

H. Adwiraah, *et al.* (2014). BERBION - Die Stadt der Zukunft: Eine bedarfsangepasste ZERO-WASTE-Bioraffinerie. Hamburg, Technische Universität Hamburg-Harburg (TUHH).

AGFW (2015). AGFW - Hauptbericht 2014. Frankfurt am Main, AGFW - Der Energieeffizienzverband für Wärme, Kälte und KWK e. V.

AGFW (2016). AGFW - Hauptbericht 2015. Frankfurt am Main, AGFW - Der Energieeffizienzverband für Wärme, Kälte und KWK e. V.

AGFW (2017). AGFW - Hauptbericht 2016. Frankfurt am Main, AGFW - Der Energieeffizienzverband für Wärme, Kälte und KWK e. V.

Agora Energiewende, *et al.* (2020). Auswirkungen der Corona-Krise auf die Klimabilanz Deutschlands - Eine Abschätzung der Emissionen 2020. Berlin, Agora Energiewende.

C. Aguilar, *et al.* (2005). "Domestic Water Heating and Water Heater Energy Consumption in Canada." from https://sites.ualberta.ca/~cbeedac/publications/documents/domwater_000.pdf.

K. Ahmed, *et al.* (2015). "Monthly domestic hot water profiles for energy calculation in Finnish apartment buildings." Energy and Buildings **97**: 77-85.

M. Aksoezen, *et al.* (2015). "Building age as an indicator for energy consumption." Energy and Buildings **87**(0): 74-86.

A. Amillo, *et al.* (2014). "A New Database of Global and Direct Solar Radiation Using the Eastern Meteosat Satellite, Models and Validation." Remote Sensing **6**(9): 8165.

E. Ampatzi and I. Knight (2012). "Modelling the effect of realistic domestic energy demand profiles and internal gains on the predicted performance of solar thermal systems." Energy and Buildings **55**: 285-298.

Andreas R. Köhler, *et al.* (2018). Ökologische und ökonomische Bewertung des Ressourcenaufwands Stationäre Energiespeichersysteme in der industriellen Produktion. Berlin, Öko-Institut e.V. - Institut für angewandte Ökologie, IZT - Institut für Zukunftsstudien und Technologiebewertung gGmbH.

A. Aretz, *et al.* (2009). "Klimaschutz auf kommunaler Ebene umsetzen - Regionale Selbstversorgung mit erneuerbaren Energien." ÖkologischesWirtschaften **4.2009**: S. 47-50.

Arge e.V. (2009). Unsere alten Häuser sind besser als ihr Ruf. Mitteilungsblatt Heft Nr. 238. Kiel, Arbeitsgemeinschaft für zeitgemäßes Bauen e.V. (Hrsg.).

ARGE Solarkataster Bamberg (2011). Solarflächenkataster - Für die Stadt und den Landkreis Bamberg. Bamberg/Würzburg/Stuttgart, Klimaallianz Stadt und Landkreis Bamberg.

G. Arlt, *et al.* (2005). Auswirkungen städtischer Nutzungsstrukturen auf Grünflächen und Grünvolumen. Dresden, Leibniz-Institut für ökologische Raumentwicklung e.V. Dresden (IÖR). **IÖR-Schriften / Band 47.**

G. Arlt and I. Lehmann (2005). Ökologische Flächenleistungen – Methodische Grundlagen, Analyse und Bewertung teilstädtischer Gebiete in Dresden. Dresden, Leibniz-Institut für ökologische Raumentwicklung.

ASUE (2011). BHKW-Kenndaten 2011. Berlin/Frankfurt a. Main, ASUE Arbeitsgemeinschaft für sparsamen und umweltfreundlichen Energieverbrauch e.V.; Stadt Frankfurt am Main -Der Magistrat- Energiereferat, Energiekonzepte Versorgungstechniken.

badenova [Hrsg] (2015). Energiepotenzialstudie und integriertes Wärmekonzept für die Stadt Offenburg. Freiburg, badenova AG & Co. KG, Freiburg.

E. Bauer (2013). Energieeffizienz und Wirtschaftlichkeit. Wien, Österreichischer Verband gemeinnütziger Bauvereinigungen.

S. Baumgartner and M. Krecher (2016). Energiepotenzialstudie Gemeinde Malterdingen. Freiburg, badenova AG & Co. KG.

BauNVO (2013). Baunutzungsverordnung in der Fassung der Bekanntmachung vom 23. Januar 1990 (BGBl. I S. 132), die zuletzt

durch Artikel 2 des Gesetzes vom 11. Juni 2013 (BGBl. I S. 1548) geändert worden ist.

M. Baur, *et al.* (2012). Energiepotenzialstudie der Gemeinde Kirchzarten. Freiburg, badenova AG & Co. KG.

BBSR/BBR (Hrsg) (2012). Die CO₂-freie Stadt - Wunsch und Wirklichkeit. D. Regnery and F. Vogel. Bonn, Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung (BBSR) im Bundesamt für Bauwesen und Raumordnung (BBR).

BBSR/BBR (Hrsg) (2017). CO₂-neutral in Stadt und Quartier –

die europäische und internationale Perspektive. BBSR-Online-Publikation. BBSR. Bonn, Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung (BBSR) im Bundesamt für Bauwesen und Raumordnung (BBR). **Nr. 03/2017**.

BDEW (2013). Stromverbrauch im Haushalt. Energie-Info. Berlin, BDEW Bundesverband der Energie- und Wasserwirtschaft e.V.: S.: 34.

BDEW (2017). Trinkwasserverwendung im Haushalt 2015, Bundesverband der Energie- und Wasserwirtschaft e.V. (BDEW).

BDEW, *et al.* (2015). BDEW/VKU/GEODE-Leitfaden Abwicklung von Standardlastprofilen Gas. Berlin, BDEW Bundesverband der Energie- und Wasserwirtschaft e.V., Verband kommunaler Unternehmen e.V. (VKU) sowie von GEODE – Groupement Européen des entreprises et Organismes de Distribution d'Énergie, EWIV.

M. Beil, *et al.* (2012). Biomethan. Gülzow-Prüzen, Fraunhofer-Institut für Windenergie und Energiesystemtechnik IWES / Bereich Bioenergie-Systemtechnik.

J. Bergner, *et al.* (2018). Das Berliner Solarpotenzial - Kurzstudie zur Verteilung des solaren Dachflächenpotenzials im Berliner Gebäudebestand. Berlin, Hochschule für Technik und Wirtschaft Berlin (HTW).

BGW (2006). Anwendung von Standardlastprofilen zur Belieferung nichtleistungsgemessener Kunden. Berlin, Bundesverband der deutschen Gas- und Wasserwirtschaft (BGW).

U. Bigalke, *et al.* (2016). dena-GEBÄUDEREPORT: Statistiken und Analysen zur Energieeffizienz im Gebäudebestand. Berlin, Deutsche Energie-Agentur GmbH (dena).

U. Bigalke, *et al.* (2012). Der dena-Gebäudereport 2012. Statistiken und Analysen zur Energieeffizienz im Gebäudebestand. Berlin, Deutsche Energie-Agentur GmbH (dena).

M. Blatter, *et al.* (1993). Warmwasserbedarfszahlen und Verbrauchscharakteristik. Bern.

M. Blesl (2002). Räumlich hochaufgelöste Modellierung leitungsgebundener Energieversorgungssysteme zur Deckung des Niedertemperaturwärmebedarfs. Dissertation, Universität Stuttgart.

M. Blesl, *et al.* (2008). Wärmeatlas Baden-Württemberg - Erstellung eines Leitfadens und Umsetzung für Modellregionen. Stuttgart, Universität Stuttgart, Institut für Energiewirtschaft und Rationelle Energieanwendung (IER).

A. Blum and K. Gruhler (2010). Typologie der gebauten Umwelt - Modellierung und Analyse der Siedlungsentwicklung mit dem Strukturtypenansatz. Aachen, SHAKER Verlag.

A. Blum and E. Wente (1980). Einfamilienhäuser in verdichteter Bauweise - Vergleichende Untersuchung über städtebauliche und gebäudetypologische Möglichkeiten und deren Einfluss auf Nutzung und Wohnwert. Stuttgart, Institut für Bauforschung e.V.

B. Blum, *et al.* (1996). Projekt Solaranlage - Planungshinweise und Beispielsammlung für thermische Solaranlagen in Objekten unterschiedlicher Nutzung. Bern, Bundesamt für Konjunkturfragen.

BMU (2019). Klimaschutzbericht 2018 zum Aktionsprogramm Klimaschutz 2020 der Bundesregierung. Berlin, Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit (BMU).

BMVBS [Hrsg.] (2012). Vergleichswerte für Verbrauch bei Wohngebäuden. Berlin, Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung (BMVBS), Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung (BBSR) im Bundesamt für Bauwesen und Raumordnung (BBR). **11/2012**.

BMWi (2010). Energiekonzept für eine umweltschonende, zuverlässige und bezahlbare Energieversorgung. Berlin.

BMWi (2017). Energiedaten: Gesamtausgabe (Stand Juni 2017). Online, Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi).

BMWi [Hrsg.] (2018). Erneuerbare Energien in Zahlen - Nationale und internationale Entwicklung im Jahr 2017. Berlin, Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi).

H. Böhnisch (2001). Nahwärme im Gebäudebestand – Anlagenaspekte und Umsetzung. Integration Erneuerbarer Energien in Versorgungsstrukturen. G. Stadermann and P. Szczepanski. Berlin, ForschungsVerbund Sonnenenergie (FVS). **Themen 2001**: 82-91.

H. Böhnisch, *et al.* (2006). Nahwärmeversorgung und Erneuerbare Energien im Gebäudebestand - Initiierung von Pilotprojekten in Baden-Württemberg, Hemmnisanalyse und Untersuchung der Einsatzbereiche. Stuttgart.

M. Braun, *et al.* (2012). Vorstudie zur Integration großer Anteile Photovoltaik in die elektrische Energieversorgung. Kassel, Fraunhofer Institut für Windenergie und Energiesystemtechnik (IWES).

L. Brodecki, *et al.* (2017). Analyse des Energie-Autarkiegrades unterschiedlich großer Bilanzräume mittels integrierter Energiesystemmodellierung. Stuttgart, Universität Stuttgart Institut für Energiewirtschaft und Rationelle Energieanwendung (IER), Universität Stuttgart Institut für Feuerungs- und Kraftwerkstechnik (IFK), Universität Stuttgart Lehrstuhl für Bauphysik, Abt. Ganzheitliche Bilanzierung (LBP-GaBi), Universität Stuttgart Zentrum für interdisziplinäre Risiko- und Innovationsforschung (ZIRIUS) und Institut für Technische Thermodynamik (ITT), Stuttgart Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt in der Helmholtz Gemeinschaft (DLR).

A. Brosowski, *et al.* (2015). Biomassepotenziale von Rest- und Abfallstoffen - Status quo in Deutschland. Schriftenreihe Nachwachsende Rohstoffe. F. N. R. e. V. (FNR). Gülzow-Prüzen, DBFZ Deutsches Biomasseforschungszentrum gemeinnützige GmbH. **36**.

R. Brusche (1983). Hackschnitzel aus Schwachholz. Münster, Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft (KTBL).

M. Buchert, *et al.* (2004). Nachhaltiges Bauen und Wohnen in Deutschland: Stoffflussbezogene Bausteine für ein nationales Konzept der nachhaltigen Entwicklung – Verknüpfung des Bereiches Bauen und Wohnen mit dem komplementären Bereich „Öffentliche Infrastruktur“. Berlin, Umweltbundesamt (UBA) (Hrsg.), Institut für angewandte Ökologie e.V. (Öko-Institut), Leibniz-Institut für ökologische Raumentwicklung e.V. Dresden (IÖR), Technische Universität Dresden - Institut für Stadtbauwesen und Straßenbau.

G. Burga, *et al.* (2010). Biogas-Messprogramm II. Gülzow, Fachagentur für nachwachsende Rohstoffe e.V. (FNR).

V. Bürger (2009). Identifikation, Quantifizierung und Systematisierung technischer und verhaltensbedingter Stromeinsparpotenziale privater Haushalte. Freiburg, Öko Institut e.V.

F. Burmeister, *et al.* (Juli 2012). „Smart Heating“: Brennwert plus Solarthermie im System Gebäude-/Anlagentechnik. Essen, Gas- und Wärme-Institut Essen e.V.

C.A.R.M.E.N. e.V. (2017). Evaluierung des Förderprogramms „CO₂-Vermeidung durch Biomasseheizwerke (BioKlima)“ - Auswertung von Betriebsdaten des Jahres 2015.

CEC and DWD (2011). Aktualisierte und erweiterte Testreferenzjahre von Deutschland für mittlere, extreme und zukünftige Witterungsverhältnisse. Offenbach, Climate & Environment Consulting Potsdam GmbH (CEC); Deutschen Wetterdienst (DWD).

CEC and DWD (2014). Handbuch - Testreferenzjahre von Deutschland für mittlere, extreme und zukünftige Witterungsverhältnisse. Offenbach, Climate & Environment Consulting Potsdam GmbH (CEC); Deutschen Wetterdienst (DWD).

L. Clavadetscher (2004). Country reports on PV system performance. IEA PVPS. IEA. Erlenbach (Switzerland), International Energy Agency.

co2online. (2017). "Warmwasser: Energiesparen bei der Warmwasserbereitung." Retrieved 10.11.2017, 2017, from <https://www.co2online.de/energie-sparen/heizenergiesparen/warmwasser/>.

B. Coenradie and L. Haag (2012). Versiegelungskartierung Berlin - Anwendung und Weiterentwicklung des hybriden Auswertungsverfahrens für das Jahr 2011 sowie Kartierung von Veränderungen. Berlin, Senatsverwaltung für Stadtentwicklung und Umwelt.

R. Corradini (2013). Regional differenzierte Solarthermie-Potenziale für Gebäude mit einer Wohneinheit. Doktor-Ingenieur, Ruhr-Universität Bochum.

R. Corradini, *et al.* (2014). Solarthermie - Technik, Potenziale, Wirtschaftlichkeit und Ökobilanz für solarthermische Systeme in Einfamilienhäusern. Ludwigsburg, Forschungsstelle für Energiewirtschaft e.V., Firma Timo Leukefeld, das komm.büro, Ruhr-Universität Bochum - Lehrstuhl Energiesysteme und Energiewirtschaft.

J. Daniel-Gromke, *et al.* (2014a). Aufbereitung von Biogas zu Biomethan und dessen Nutzung – Status quo und Perspektiven –. Immissionsschutz. K. J. Thomé-Kozmiensky and M. Löschau. Neuruppin, TK Verlag Karl Thomé-Kozmiensky. **Band 4**: S. 133-150.

J. Daniel-Gromke, *et al.* (2013). Stromerzeugung aus Biomasse (Zwischenbericht). Leipzig, Deutsches Biomasseforschungszentrum gemeinnützige GmbH (DBFZ).

J. Daniel-Gromke, *et al.* (2014b). Stromerzeugung aus Biomasse (Zwischenbericht 2014). Leipzig, Deutsches Biomasseforschungszentrum gemeinnützige GmbH (DBFZ).

I. Danielski, *et al.* (2012). The impact of the shape factor on final energy demand in residential buildings in nordic climates. World Renewable Energy Forum, WREF 2012, Including World Renewable Energy Congress XII and Colorado Renewable Energy Society (CRES) Annual Conference; Denver, CO; 13 May 2012 through 17 May 2012; Code 94564: 4260-4264.

B. Decker and U. Jahn (1997). "Performance of 170 grid connected PV plants in Northern Germany—Analysis of yields and optimization potentials." Solar Energy **59**(4): 127-133.

Defra (2008). Measurement of Domestic Hot Water Consumption in Dwellings.

J. Deidert, *et al.* (2012). Integration von Heizkesseln in Wärmeverbundsysteme mit großen Solaranlagen. Teil 1: Auswertung von Feldanlagen. Wolfenbüttel, Ostfalia Hochschule

C. Deilmann, *et al.* (2017). Stadt im Spannungsfeld von Kompaktheit, Effizienz und Umweltqualität Anwendungen urbaner Metrik. Berlin, Heidelberg, Springer Spektrum.

DESTATIS (2008). Bestand und Struktur der Wohneinheiten. Fachserie 5 Heft 1 - Mikrozensus-Zusatzerhebung 2006. Wiesbaden, Statistisches Bundesamt.

DESTATIS (2012). Bestand und Struktur der Wohneinheiten. Fachserie 5 Heft 1 - Mikrozensus-Zusatzerhebung 2010. Wiesbaden, Statistisches Bundesamt.

DESTATIS (2015). Wirtschaftsrechnungen. Laufende Wirtschaftsrechnungen Ausstattung privater Haushalte mit ausgewählten Gebrauchsgütern Fachserie 15 Reihe 2 Wiesbaden, Statistisches Bundesamt.

DESTATIS (2016). Bestand und Struktur der Wohneinheiten. Fachserie 5 Heft 1 - Mikrozensus-Zusatzerhebung 2014. Wiesbaden, Statistisches Bundesamt.

DESTATIS (2017a). Bevölkerung und Erwerbstätigkeit - Haushalte und Familien Ergebnisse des Mikrozensus 2016. Fachserie 1, Reihe 3. Wiesbaden, Statistisches Bundesamt (Destatis).

DESTATIS (2017b). Gemeindeverzeichnis - Alle politisch selbständigen Gemeinden (mit Gemeindeverband) in Deutschland nach Fläche, Bevölkerung, Bevölkerungsdichte und der Postleitzahl des Verwaltungssitzes der Gemeinde. Ergänzt um die geografischen Mittelpunktkoordinaten, Reisegebiete und Grad der Verstädterung. Wiesbaden, Statistisches Bundesamt (Destatis).

DESTATIS (2018). Umweltnutzung und Wirtschaft - Tabellen zu den Umweltökonomischen Gesamtrechnungen Teil 2: Energie - Berichtszeitraum 2000 - 2016. S. B. (Destatis). Wiesbaden.

J. Deutsche, *et al.* (2015). "Energie-Autarkie und Energie-Autonomie in Theorie und Praxis." Zeitschrift für Energiewirtschaft **39**(3): 151-162.

DGS (2013). Photovoltaische Anlagen - Leitfaden für das Elektro- und Dachdeckerhandwerk, Fachplaner, Architekten, Ingenieure, Bauherren und Weiterbildungsinstitutionen. Berlin, Deutsche Gesellschaft für Sonnenenergie (DGS).

N. Diefenbach (2013) "Basisdaten für Hochrechnungen mit der Deutschen Gebäudetypologie des IWU: Neufassung Oktober 2013."

N. Diefenbach, *et al.* (2010). Datenbasis Gebäudebestand - Datenerhebung zur energetischen Qualität und zu den Modernisierungstrends im deutschen Wohngebäudebestand. Darmstadt, Institut Wohnen und Umwelt (IWU) & Bremer Energie Institut (BEI).

N. Diefenbach, *et al.* (2002). Energetische Kenngrößen für Heizungsanlagen im Bestand. Darmstadt, Institut für Wohnen und Umwelt (IWU).

DIN and VDE (2010). Photovoltaische Solarenergiesysteme - Begriffe, Definitionen und Symbole (IEC/TS 61836:2007); Deutsche Fassung CLC/TS 61836:2009. Berlin.

DIN V 4108 (2003-6). Wärmeschutz und Energie-Einsparung in Gebäuden; geändert durch Berichtigung 1 2004-03. Deutsches Institut für Normung (DIN). Berlin, Beuth Verlag.

G. G. Dittrich (1979). Studie Stadthaus. Bonn, Bundesminister für Raumordnung, Bauwesen und Städtebau.

M. Doherty, *et al.* (2009). Relationships between form, morphology, density and energy in urban environments. International Conference on Human Ecology, Manchester (UK), The Society for Human Ecology (SHE).

C. Dötsch, *et al.* (1998). Leitfaden Nahwärme. UMSICHT-Schriftenreihe. Stuttgart, Fraunhofer UMSICHT. 6.

E. Dunkelberg, *et al.* (2011). Dezentrale Mikro-Biogaserzeugung. Berlin/Freiburg.

DVGW G 260 DVGW G 260:2013-03 - Gasbeschaffenheit. DVGW Deutscher Verein des Gas- und Wasserfaches e. V. Bonn, DVGW Deutscher Verein des Gas- und Wasserfaches e. V.

DVGW G 262 DVGW G 262:2013-03 - Nutzung von Gasen aus regenerativen Quellen in der öffentlichen Gasversorgung. DVGW Deutscher Verein des Gas- und Wasserfaches e. V. Bonn, DVGW Deutscher Verein des Gas- und Wasserfaches e. V.

ECOFYS (2004). Leitbilder und Potenziale eines solaren Städtebaus. o.A., Ecofys GmbH, RWTH Aachen - Lehrstuhl für Städtebau und Landschaftsplanung, Fachhochschule Köln - Institut für Landmaschinentechnik und regenerative Energien.

Ecofys, *et al.* (2014). Energiekonzept Hamburg - Dulsberg. Hamburg.

U. Eicker and M. Klein (2014). "Large-scale renewable energy integration within energy-efficient urban areas: results from three German case studies." International Journal of Low-Carbon Technologies 9(3): 202-213.

Energieagentur Rheinland-Pfalz. (2019). "Energieatlas Rheinland-Pfalz - Stromverbrauch nach Sektoren 2014." Retrieved 02.02.2019, 2019, from <https://www.energieatlas.rlp.de/earp/daten/strom/stromverbrauch/suche/2014/073130000/absolut/>.

EnergieAgentur.NRW (2011). Erhebung „Wo im Haushalt bleibt der Strom?“, EnergieAgentur.NRW.

EnergieAgentur.NRW (2015). Erhebung „Wo im Haushalt bleibt der Strom?“ - Stromverbrauchsanteile verschiedener Anwendungsbereiche in Ein- bis Fünf-Personen-Haushalten – 2015 und 2011 im Vergleich, EnergieAgentur.NRW.

EnEV (2013). Energieeinsparverordnung - Zweite Verordnung zur Änderung der Energieeinsparverordnung vom 18. November 2013 (BGBl. I S. 3951).

I. Erfurt, *et al.* (2011). Vorbereitung und Begleitung der Erstellung des Erfahrungsberichtes 2011 gemäß § 65 EEG - Vorhaben IIc "Solare Strahlungsenergie". Leipzig, Leipziger Institut für Energie GmbH (IE Leipzig), Zentrum für Sonnenenergie- und Wasser-stoff-Forschung Baden-Württemberg, Fraunhofer-Institut für Windenergie und Energiesystemtechnik, Bosch & Partner GmbH und SOKO-Institut für Sozialforschung und Kommunikation.

EUROSTAT (2011). The new degree of urbanisation. RAMON - Reference And Management Of Nomenclatures. Brüssel, EUROSTAT.

S. Evans, *et al.* (2018). Building Stock Modelling and the Relationship between Density and Energy Use. 4th Building Simulation and Optimization Conference, Cambridge (UK), International Building Simulation Association (England).

J. C. Evarts and L. G. Swan (2013). "Domestic hot water consumption estimates for solar thermal system sizing." Energy and Buildings **58**(Supplement C): 58-65.

D. Everding and M. Kloos (2007). Solarer Städtebau :vom Pilotprojekt zum planerischen Leitbild. Stuttgart, Kohlhammer Verlag.

EWL (2016). Abfallwirtschaftskonzept 2016. Landau, Entsorgungs- und Wirtschaftsbetrieb Landau in der Pfalz (EWL).

S. Faberi, *et al.* (2007). LOT 14: Domestic Washing Machines & Dishwashers - Final Report (Draft Version Task 3 - 5).

W. Fichtner, *et al.* (2012). Vergleichende Untersuchungen an großtechnischen Biogasreaktoren - mikrobiologische, verfahrenstechnische, ökologische und ökonomische Bewertung und Optimierung: OPTGAS. Karlsruhe, Karlsruher Institut für Technologie KIT: 61.

D. Fischer, *et al.* (2015). "Model for electric load profiles with high time resolution for German households." Energy and Buildings **92**: 170-179.

D. Fischer, *et al.* (2016). "A stochastic bottom-up model for space heating and domestic hot water load profiles for German households." Energy and Buildings **124**: 120-128.

FNR (2013). Leitfaden Biogas - Von der Gewinnung zur Nutzung. Gülzow-Prüzen, Fachagentur für Nachwachsende Rohstoffe e.V. (FNR).

N. B. F. Fradj and M.-O. Löwner (2012). Abschätzung des nutzbaren Dachflächenanteils für Solarenergie mit CityGML-Gebäudemodellen und Luftbildern. Geoinformatik 2012 "Mobilität und Umwelt". Braunschweig, Löwner, M.-O., Hillen, F. & Wohlfahrt, R. (Hrsg.).

Fraunhofer-Gesellschaft (2012). Die Stadt von Morgen – die Morgenstadt.

J. Fripan (2002). Restmüllzusammensetzung in Abhängigkeit von der Siedlungsstruktur. Restmüllanalysen - eine Grundlage eines nachhaltigen Stoffstrommanagements in der Abfallwirtschaft, Augsburg, Bayerisches Landesamt für Umweltschutz (LfU).

M. Frondel, *et al.* (2015). Erhebung des Energieverbrauchs der privaten Haushalte für die Jahre 2011-2013. Berlin, Rheinisch-Westfälisches Institut für Wirtschaftsforschung (RWI), forsa Gesellschaft für Sozialforschung und statistische Analysen mbH: S.: 182.

M. Frondel, *et al.* (2011). Erhebung des Energieverbrauchs der privaten Haushalte für die Jahre 2006-2008. Berlin, Rheinisch-Westfälisches Institut für Wirtschaftsforschung (RWI), forsa Gesellschaft für Sozialforschung und statistische Analysen mbH: S.: 182.

M. Frondel, *et al.* (2013). Erhebung des Energieverbrauchs der privaten Haushalte für die Jahre 2009-2010. Berlin, Rheinisch-Westfälisches Institut für Wirtschaftsforschung (RWI), forsa Gesellschaft für Sozialforschung und statistische Analysen mbH: S.: 182.

M. Frondel and N. Ritter (2010). Datenauswertung zum Energieverbrauch der privaten Haushalte differenziert nach Gebäudemerkmale - Sonderauswertung im Auftrag des Bundesministeriums für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung (BMVBS). Essen, RWI (Rheinisch-Westfälisches Institut für Wirtschaftsforschung)

M. Frondel and N. Ritter (2012). Datenauswertung zum Energieverbrauch der privaten Haushalte differenziert nach Gebäudemerkmale: Sonderauswertung im Auftrag des Bundesministeriums für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung (BMVBS). RWI Projektberichte. Essen, RWI - Leibniz-Institut für Wirtschaftsforschung.

C. Gargiulo and L. Russo (2017). "Cities and Energy Consumption: a Critical Review." Tema. Journal of Land Use, Mobility and Environment **Vol 10**(No 3 (2017): Methods, Tools and Best Practices to Increase the Capacity of Urban Systems to Adapt to Natural and Man-Made Changes).

A. Gassel (1997). Beiträge zur Berechnung solarthermischer und exergieeffizienter Energiesysteme. Dissertation, TU Dresden.

L. Gelažanskas and K. Gamage (2015). "Forecasting Hot Water Consumption in Residential Houses." Energies **8**(11): 12336.

D. D. Genske, *et al.* (2009). Nutzung städtischer Freiflächen für erneuerbare Energien. ExWost. Berlin/Bonn, Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung (BMVBS), Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung (BBSR) im Bundesamt für Bauwesen und Raumordnung (BBR).

D. George, *et al.* (2015). "High resolution measured domestic hot water consumption of Canadian homes." Energy and Buildings **109**: 304-315.

O. Gerin, *et al.* (2014). Seasonal variation of hot and cold water consumption in apartment buildings. W062 40th International Symposium on Water Supply and Drainage For Buildings, Sao Paulo, International Council for Building.

J. H. Gerstenberg, *et al.* (2016). Informationssystem Stadt und Umwelt, Umweltatlas: Flächennutzung und Stadtstruktur - Dokumentation der Kartiereinheiten und Aktualisierung des Datenbestandes 2015. Berlin, Senatsverwaltung für Stadtentwicklung (Hrsg.).

J. H. Gerstenberg, *et al.* (2010). Informationssystem Stadt und Umwelt : Flächennutzung und Stadtstruktur - Dokumentation der Kartiereinheiten und Aktualisierung des Datenbestandes. Berlin, Senatsverwaltung für Stadtentwicklung (Hrsg.).

P. S. Giesa and C. Tiebel (2012). Ermittlung des Potenzials organischer Abfälle in der Stadt Neumünster. Hamburg, ATUS GmbH.

M. Girodo (2006). Solarstrahlungsvorhersage auf der Basis numerischer Wettermodelle. Doktor Dissertation, Carl von Ossietzky Universität Oldenburg.

C. Göbel, *et al.* (2012). Verringerung von Lebensmittelabfällen – Identifikation von Ursachen und Handlungsoptionen in Nordrhein-Westfalen. Münster.

T. Göllinger, *et al.* (2011). EOS - Energieoptimierte Stadt. Siegen.

U. Görisch and M. Helm (2014). Biogasanlagen. Stuttgart.

F. Graf, *et al.* (2009). "Stand des DVGW-Forschungsprogramms "Biogas"." Energie | wasser-praxis **6**(2009): 66-71.

M. Greller, *et al.* (2010). "Universelle Energiekennzahlen für Deutschland — Teil 2: Verbrauchskennzahlentwicklung nach Baualtersklassen." Bauphysik **32**(1): 1-6.

R. Grießhammer, *et al.* (2012) "Überschlägige Aufschlüsselung des Stromverbrauchs unterschiedlicher Haushaltstypen." 7.

K. Gröll, *et al.* (2015). Optimierung der Erfassung von Küchen- und Nahrungsabfällen durch den Einsatz kompostierbarer Biobeutel - Praxisversuch Stadt Vellmar, Landkreis Kassel. Bio- und Sekundärrohstoffverwertung X. Witzenhausen, Klaus Wiemer, Michael Kern, Thomas Raussen: S. 170-189.

K. Gruhler, *et al.* (2002). Stofflich-energetische Gebäudesteckbriefe - Gebäudevergleiche und Hochrechnungen für Bebauungsstrukturen. Dresden, Institut für ökologische Raumentwicklung e.V. (Dresden).

R. Haas, *et al.* (2002). Photovoltaik in Gebäuden IEA Task 7. Berichte aus Energie- und Umweltforschung. Wien, Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie.

K. Habermann-Nieß, *et al.* (2013). Energetische Stadtsanierung Osnabrück Dodesheide - Integriertes Quartierskonzept. Hannover/Bremen, plan zwei – Stadtplanung und Architektur & Bremer Energie Institut.

M. Hall and A. Geissler (2017). The impact of different energy balancing methods on Net Zero Energy Buildings. 12th Conference on Advanced Building Skins. A. B. S. GmbH. Bern, Advanced Building Skins GmbH.

I. G. Hamilton, *et al.* (2010). "Exploring energy integration between new and existing developments." Building Research & Information **38**(6): 593-609.

M. Hegger and J. Dettmar (2014). Energetische Stadtraumtypen - Strukturelle und energetische Kennwerte von Stadträumen. Stuttgart, Fraunhofer IRB Verlag.

M. Hegger, *et al.* (2012). UrbanReNet: EnEff:Stadt - Verbundprojekt Netzoptimierung - Teilprojekt: Vernetzte regenerative Energiekonzepte im Siedlungs- und Landschaftsraum. Darmstadt, TU Darmstadt - Fachgebiet Entwerfen und Energieeffizientes Bauen (FB Architektur), Fachgebiet Entwerfen und Freiraumplanung (FB Architektur), Fachgebiet diskrete Optimierung (FB Mathematik); Forschungsstelle für Energiewirtschaft (München); TU Dresden - Fakultät Maschinenwesen, Institut für Thermodynamik und Technische Gebäudeausrüstung (Dresden).

H. Heinrich, *et al.* (2006). Energieeffizienz durch Altbausanierung in Rheinland-Pfalz. Mainz, TU Kaiserslautern, Fachgebiet Bauphysik / TGA / Baulicher Brandschutz.

J. P. Heisel (2013). Planungsatlas :Praxishandbuch Bauentwurf. Berlin; Wien; Zürich, Beuth Verlag GmbH.

C. Heller (2015). Tangeln zeigt, wie es geht. Ein Dorf stellt (wieder) auf erneuerbare Energien um. Magdeburg.

M. Hellwig (2003). Entwicklung und Anwendung parametrisierter Standard-Lastprofile, Technische Universität München (TUM).

D. Henssen (2009). Einführung und Optimierung der getrennten Sammlung zur Nutzbarmachung von Bioabfällen - Handbuch für öffentlich-rechtliche Entsorgungsträger, Abfallbehörden, Entscheidungsträger, Planer und Entsorgungsunternehmen. Aachen und Köln-Gremberghoven, VHE - Verband der Humus- und Erdenwirtschaft e. V., Bundesgütegemeinschaft Kompost e. V.

S. Hettich, *et al.* (2012). Energiepotenzialstudie Gemeinde Albrück. Freiburg, badenova AG & Co. KG.

S. Hettich and M. Rist (2013). Energiepotenzialstudie der Gemeinde Binzen. Freiburg, badenova AG & Co. KG.

E. Hinz (2006). Gebäudetypologie Bayern - Entwicklung von 11 Hausdatenblättern zu typischen Gebäuden aus dem Wohngebäudebestand Bayerns Darmstadt, Institut Wohnen und Umwelt GmbH.

B. Hirschl, *et al.* (2010). Kommunale Wertschöpfung durch Erneuerbare Energien. Schriftenreihe des IÖW. Berlin, Institut für ökologische Wirtschaftsforschung (IÖW).

P. Huber and M. Gehring (2015). Energiepotenzialstudie Gemeinde Glottertal. Freiburg, badenova AG & Co. KG, Freiburg.

IBA Hamburg (2010). Energieatlas: Zukunftskonzept Erneuerbares Wilhelmsburg. Hamburg, Internationale Bauausstellung IBA Hamburg (Hrsg.).

IdE (2012). Regionale Erfolgsbeispiele auf dem Weg zu 100% EE. Kassel, IdE Institut dezentrale Energietechnologien.

IEA (2008). World Energy Outlook 2008. Paris, International Energy Agency (IEA).

IfaS (2018). Integriertes Klimaschutzkonzept der Stadt Landau. Birkenfeld, Hochschule Trier, Umwelt-Campus Birkenfeld, Institut für angewandtes Stoffstrommanagement (IfaS).

Internationale Bauausstellung IBA Hamburg (Hrsg.) (2010). Energieatlas: Zukunftskonzept Erneuerbares Wilhelmsburg. Hamburg, Internationale Bauausstellung IBA Hamburg (Hrsg.).

K. Jagnow and D. Wolff (2007). Technische Optimierung und Energieeinsparung. Osnabrück.

M. Jaszczur, *et al.* (2018). "Temporal load resolution impact on PV/grid system energy flows." MATEC Web Conf. **240**: 04003.

M. Jehling, *et al.* (2015). Erkennung von energetischen Sanierungspotenzialen im Wohnungsbestand als Grundlage für Szenarien. Flächennutzungsmonitoring VII. Boden – Flächenmanagement – Analysen und Szenarien. G. Meinel, U. Schumacher, M. Behnisch and T. Krüger. Dresden, Rhombos-Verlag: S. 329-340.

R. V. Jones and K. J. Lomas (2015). "Determinants of high electrical energy demand in UK homes: Socio-economic and dwelling characteristics." Energy and Buildings **101**: 24-34.

J. Jörissen, *et al.* (2015). "Food Waste Generation at Household Level: Results of a Survey among Employees of Two European Research Centers in Italy and Germany." Sustainability **7**(3): 2695–2715.

JRC. (2017, 22.09.2017). "PVGIS - Overview of PVGIS data sources and calculation methods." from http://re.jrc.ec.europa.eu/pvg_static/methods.html.

- R. Kaden (2014). Berechnung der Energiebedarfe von Wohngebäuden und Modellierung energiebezogener Kennwerte auf der Basis semantischer 3D-Stadtmodelle. Doktor Dissertation, TU München.
- A. Kähler and J. Klein (2014). Vorsicht bei Amortisationsrechnung. IKZ-Fachplaner. Arnsberg, STROBEL VERLAG GmbH & Co. KG. **Heft 08/2014**: 16-19.
- M. Kaltschmitt, *et al.* (2016). Energie aus Biomasse - Grundlagen, Techniken und Verfahren. Berlin, Heidelberg, Springer Vieweg.
- M. Kaltschmitt, *et al.* (2006). Erneuerbare Energien - Systemtechnik, Wirtschaftlichkeit, Umweltaspekte. Berlin & Heidelberg, Andreas Wiese (Hrsg.).
- M. Kaltschmitt and A. Wiese (1993). Erneuerbare Energieträger in Deutschland. Berlin, Heidelberg, New York, Springer Verlag.
- C. Kemfert, *et al.* (2018). "Klimaziel 2020 verfehlt: Zeit für eine Neuausrichtung der Klimapolitik?" ifo Schnelldienst **71. Jahrgang** (01): S. 3-25.
- A. Kemmler, *et al.* (2017). Datenbasis zur Bewertung von Energieeffizienzmaßnahmen in der Zeitreihe 2005 – 2014. Dessau-Roßlau.
- T. Kenkmann, *et al.* (2011). Freiburg 2050 – Auf dem Weg zur Klimaneutralität. Freiburg, Öko-Institut e.V.
- M. Kern, *et al.* (2010). Aufwand und Nutzen einer optimierten Bioabfallverwertung hinsichtlich Energieeffizienz, Klima- und Ressourcenschutz. UBA TEXTE 43/2010. Dessau-Roßlau, Witzenhausen-Institut
- M. Kern and J. Siepenkothen (2014a). Bioabfallerfassung 2.0 – Stand und Perspektiven vor dem Hintergrund der Kaskadennutzung. Bioabfallerfassung und Verwertung ab 2015, Witzenhausen, Michael Kern, Thomas Raussen.
- M. Kern and J. Siepenkothen (2014b). "Bioabfallpotenzial im Hausmüll: Modellbetrachtung zur Steigerung der Erfassung von Bioabfällen aus dem Hausmüll." Müll und Abfall **46. Jahrgang**(7): 356-360.
- M. Kern, *et al.* (2015). Bio-OPTI – Defizite und Optimierungspotenziale bei der Erfassung von Küchen- und Nahrungsabfällen. Bioabfallerfassung und -verwertung 2.0., Witzenhausen, M. Kern, T. Raussen.
- S. Kleinhüchelkotten, *et al.* (2016). Repräsentative Erhebung von Pro-Kopf-Verbräuchen natürlicher Ressourcen in Deutschland (nach Bevölkerungsgruppen). TEXTE. Dessau-Roßlau. **39/2016**.
- F. Knappe, *et al.* (2007). Stoffstrommanagement von Biomasseabfällen mit dem Ziel der Optimierung der Verwertung organischer Abfälle. UBA TEXTE 4/2007. Dessau-Roßlau,

Ifeu-Institut für Energie- und Umweltforschung (Heidelberg), Öko-Institut für angewandte Ökologie (Darmstadt).

I. Knight and H. Ribberink (2007). European and Canadian non-HVAC Electric and DHW Load Profiles for Use in Simulating the Performance of Residential Cogeneration Systems. Annex 42, International Energy Agency.

P. Knüsel and M. Gallati (2011). Nutzerverhalten beim Wohnen. Analyse, Relevanz und Potenzial von Massnahmen zur Reduktion des Energieverbrauchs. Zürich.

Kommission "Wachstum, Strukturwandel und Beschäftigung" (2019). Kommission „Wachstum, Strukturwandel und Beschäftigung“ - Abschlussbericht. Berlin.

Korda M. (Hrsg.), *et al.* (2005). Städtebau - Technische Grundlagen. Stuttgart/Leipzig/Wiesbaden, Teubner Verlag.

I. Körner, *et al.* (2011). Anaerobe Nutzbarkeit von Roh- und Reststoffen aus dem Umfeld einer Stadt – Ergebnisse des Modellprojektes BERBION. 8. Biogastagung Biogas aus Abfällen und Reststoffen 28. – 29. September 2011. Dresden art'otel, TU Hamburg-Harburg.

M. Koziol, *et al.* (2011). Handlungsleitfaden zur energetischen Stadterneuerung. Berlin/Bonn, Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung (BMVBS) (Hrsg.), Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung (BBSR) im Bundesamt für Bauwesen und Raumordnung (BBR), Brandenburgische Technische Universität Cottbus - Lehrstuhl Stadttechnik.

M. Kranert, *et al.* (2012). Ermittlung der weggeworfenen Lebensmittelmengen und Vorschläge zur Verminderung der Wegwerfrate bei Lebensmitteln in Deutschland. Stuttgart, Universität Stuttgart, Institut für Siedlungswasserbau, Wassergüte- und Abfallwirtschaft, Lehrstuhl für Abfallwirtschaft und Abluft; Universität für Bodenkultur Wien, Institut für Abfallwirtschaft.

G. Krapf (2000). Biomasseheizwerke auf dem Prüfstand: Evaluierung von Pilot- und Demonstrationsanlagen zur regenerativen Energieerzeugung auf Basis von Biomasse in Deutschland - gekürzte Fassung des Endberichts -. Straubing, C.A.R.M.E.N.e.V.

P. Krause, *et al.* (2015). Verpflichtende Umsetzung der Getrenntsammlung von Bioabfällen. UBA TEXTE 84/2014. Dessau-Roßlau.

N. Krauß (2009). Vergleich von drei Methoden zur Bestimmung des solarenergetischen Potentials der kreisfreien Stadt Landau in der Pfalz. Diplom Diplomarbeit, Universität Koblenz-Landau (Kampus Landau).

N. Krauß (2013). Estimation of energy saving potentials of neighbourhoods. SB 13 Munich "Implementing sustainability - barriers and chances"- Sustainable Building Conference. N. Eßig. München, Fraunhofer IRB Verlag: S.1118-1125.

M. Kress and I. Landwehr (2012). Akzeptanz Erneuerbarer Energien in EE-Regionen. Berlin, Institut für ökologische Wirtschaftsforschung (IÖW).

D. Kuptz, *et al.* (2015). Optimale Bereitstellungs verfahren für Holzhackschnitzel. Berichte aus dem TFZ. Straubing, Technologie- und Förderzentrum (TFZ). **40**.

Landesamt für Statistik Niedersachsen (2015). Zensus 2011 - Gebäude- und Wohnungsbestand in Deutschland. Hannover.

S. Lintner, *et al.* (2010). Energie und Ortsplanung. Arbeitsblätter für die Bauleitplanung Nr. 17. München, Oberste Baubehörde im Bayerischen Staatsministerium des Innern.

M. Lödl, *et al.* (2010). Abschätzung des Photovoltaik-Potenzials auf Dachflächen in Deutschland. **11. Symposium Energieinnovation**. T. U. G. Institut für Elektrizitätswirtschaft und Energieinnovation. Graz (Austria), Technische Universität Graz.

T. Loga, *et al.* (2011). Deutsche Gebäudetypologie: Beispielhafte Maßnahmen zur Verbesserung der Energieeffizienz von typischen Wohngebäuden Darmstadt, INSTITUT WOHNEN UND UMWELT GMBH.

T. Loga, *et al.* (2005). Entwicklung eines vereinfachten, statistisch abgesicherten Verfahrens zur Erhebung von Gebäudedaten für die Erstellung des Energieprofils von Gebäuden. Darmstadt, Institut Wohnen und Umwelt GmbH (IWU).

T. Loga, *et al.* (2012). TABULA – Scientific Report Germany – Further Development of the German Residential Building Typology. Darmstadt, Institut Wohnen und Umwelt (IWU).

T. Loga, *et al.* (2015). Deutsche Wohngebäudetypologie: Beispielhafte Maßnahmen zur Verbesserung der Energieeffizienz von typischen Wohngebäuden (2. erweiterte Auflage). Darmstadt, INSTITUT WOHNEN UND UMWELT GMBH.

G. Ludes, *et al.* (2013). Potenzialstudie Erneuerbare Energien NRW: Teil 2 - Solarenergie. LANUV-Fachbericht 40. LANUV. Recklinghausen, Landesamt für Natur, Umwelt und Verbraucherschutz Nordrhein-Westfalen (LANUV).

J. K. Lüth (2017). Photovoltaik auf Gebäuden: eine GIS-gestützte Ermittlung des Potenzials in Baden-Württemberg. Bachelor, Karlsruhe Institut für Technologie (KIT).

J. D. Lutz, *et al.* (1996). Modeling patterns of hot water use in households. Berkeley (California), Energy and Environment Division - Ernest Orlando Lawrence Berkeley National Laboratory.

K. Lylykangas (2009). Shape Factor as an Indicator of Heating Energy Demand: Gebäudeformbeiwert als Indikator für den Heizenergiebedarf. **15. Internationales Holzbau-Forum 09**. M. I. Brander. Garmisch-Partenkirchen, Fraunhofer IRB Verlag

- K. Mainzer, *et al.* (2017). "Assessment of rooftop photovoltaic potentials at the urban level using publicly available geodata and image recognition techniques." Solar Energy **155**: 561-573.
- G. Makrides, *et al.* (2012). Performance of Photovoltaics Under Actual Operating Conditions. Third Generation Photovoltaics. V. Fthenakis, InTech: S. 232.
- D. Mangold, *et al.* (2012). Technisch-Wirtschaftliche Analyse und Weiterentwicklung der solaren Langzeit-Wärmespeicherung. Stuttgart, Steinbeis Forschungsinstitut für solare und zukunftsfähige thermische Energiesysteme (solites).
- D. Mangold, *et al.* (2007). Solare Nahwärme und Langzeit-Wärmespeicher. Stuttgart, Solites.
- C. Marb, *et al.* (2003). Zusammensetzung und Schadstoffgehalt von Siedlungsabfällen. Augsburg, Bayerisches Landesamt für Umweltschutz.
- B. Marion, *et al.* (2005). Performance Parameters for Grid-Connected PV Systems. Prepared for the 31st IEEE Photovoltaics Specialists Conference and Exhibition. National Renewable Energy Laboratory (NREL). Lake Buena Vista, Florida, National Renewable Energy Laboratory (NREL).
- R. McKenna, *et al.* (2015). Energieautarkie: Definitionen, Für- bzw. Gegenargumente, und entstehende Forschungsbedarfe. WORKING PAPER SERIES IN PRODUCTION AND ENERGY. KIT. Karlsruhe, Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Hochschule für Wirtschaft und Umwelt (HfWU) Nürtingen-Geislingen.
- H. Meier, *et al.* (1999). Repräsentative VDEW-Lastprofile VDEW-Materialien. Frankfurt (Main), Verband der Elektrizitätswirtschaft e. V. (VDEW). **M-32/99**.
- G. Meinel and R. Hecht (2005). Bestimmung des blockbezogenen Grünvolumens für die Fläche der Stadt Dresden auf Basis von Laserscannerdaten. Dresden, Leibniz-Institut für ökologische Raumentwicklung (IÖR).
- G. Meinel, *et al.* (2014). Grünvolumenbestimmung der Stadt Dresden auf der Grundlage von Laserscandaten. Dresden, Leibniz-Institut für ökologische Raumentwicklung e.V. Dresden (IÖR).
- G. Meinel, *et al.* (2008). Automatische Ableitung von stadtstrukturellen Grundlagendaten und Integration in einem Geographischen Informationssystem. Bonn, Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung (BMVBS), Bundesamt für Bauwesen und Raumordnung (BBR). **Forschungen Heft 134**
- C. Michelsen (2015). Wärmemonitor Deutschland 2014: Rückläufiger Energiebedarf und lange Sanierungszyklen (3. korrigierte Fassung). DIW Wochenbericht Berlin, Deutsches Institut für Wirtschaftsforschung e.V. **Nr. 41.2015**: S. 920-931.

- C. Michelsen (2016). Wärmemonitor 2015: Mit der Erfahrung kommt der Sanierungserfolg (2. korrigierte Fassung). DIW Wochenbericht Berlin, Deutsches Institut für Wirtschaftsforschung e.V. **Nr. 39.2016**.
- C. Michelsen and S. Müller-Michelsen (2010). "Energieeffizienz im Altbau: Werden die Sanierungspotenziale überschätzt? Ergebnisse auf Grundlage des ista-IWH-Energieeffizienzindex." Wirtschaft im Wandel **9**(2010): 447-455.
- C. Michelsen, *et al.* (2014). Wärmemonitor Deutschland 2013: gesunkener Heizenergiebedarf, gestiegene Kosten. DIW Wochenbericht Berlin, Deutsches Institut für Wirtschaftsforschung e.V. **Nr. 41.2014**: S. 920-931.
- C. Michelsen and N. Ritter (2017). Wärmemonitor 2016: Die "zweite Miete" sinkt trotz gestiegenem Heizenergiebedarf. DIW Wochenbericht Berlin, Deutsches Institut für Wirtschaftsforschung e.V. **Nr. 38.2017**.
- M. Mieke, *et al.* (2013). Analyse der thermischen Solaranlagen und deren Alternativen. Wolfenbüttel.
- N. Mohajeri, *et al.* (2016). "Effects of urban compactness on solar energy potential." Renewable Energy **93**: 469-482.
- P. Moraitis, *et al.* (2018). "Urban Environment and Solar PV Performance: The Case of the Netherlands." Energies **11**(6): 1333.
- M. Morganti, *et al.* (2017). "Urban morphology indicators for solar energy analysis." Energy Procedia **134**: 807-814.
- J. Moshövel, *et al.* (2015). Analyse des wirtschaftlichen, technischen und ökologischen Nutzens von PV-Speichern. Aachen/Berlin, Institut für Stromrichtertechnik und Elektrische Antriebe (ISEA) an der RWTH Aachen, Institut für ökologische Wirtschaftsforschung (IÖW), Institut für Hochspannungstechnik (IFHT) an der RWTH Aachen.
- R. W. Mueller, *et al.* (2009). "The CM-SAF operational scheme for the satellite based retrieval of solar surface irradiance — A LUT based eigenvector hybrid approach." Remote Sensing of Environment **113**(5): 1012-1024.
- N. Müller, *et al.* (2017). Bebauungsstrukturklassifikation NRW - Grundlage für Klimamodellsimulationen. Flächennutzungsmonitoring IX, Dresden, Rhombos-Verlag.
- J. Neuß and B. Pietzsch (2002). Nutzung der Überschusswärme einer landwirtschaftlichen Biogasanlage in Kombination mit landwirtschaftlichen Produktionsabläufen. Freilingen/Aachen, Ingenieurbüro H. Berg & Partner GmbH, BOSZ-BIO-ENERGIE GmbH.

H. Nonn, *et al.* (2006). "Qualitätseigenschaften verschiedener Gebrauchsrasenmischungen - Teil 1: Versuchsanlage, Aufwuchshöhe und Schnittgutanteil." Rasen/Turf/Gazon **2**(2006): 136-141.

C. Nytsch-Geusen, *et al.* (2016). Nachhaltige und energieeffiziente Bestandsentwicklung von Stadtquartieren – Entwicklung eines Analyse- und Planungstools zur energetischen Bewertung und Sanierung von Stadtquartieren (Open eQuarter). Forschungsinitiative ZukunftBau. Stuttgart. **F 2991**.

F. Ochs (2013). Stand der Technik erdvergrabener Wärmespeicher.

F. Ochs and PKi (k.A.). Weiterentwicklung der Erdbecken-Wärmespeichertechnologie. Stuttgart, Institut für Thermodynamik und Wärmetechnik (ITW), Pfeil und Koch Ingenieurgesellschaft.

B. Oschatz (2009). Erarbeitung eines Leitfadens zum Abgleich Energiebedarf – Energieverbrauch. Stuttgart, ITG Dresden, IWU Darmstadt, FH Braunschweig/Wolfenbüttel, Schiller Engineering, W. Reiners, Fraunhofer IBP, Ages, IBUS Berlin.

R. Papa, *et al.* (2014). "Urban energy consumptions: its determinants and future research." **1**: 561-570.

D. S. Parker (2003). "Research highlights from a large scale residential monitoring study in a hot climate." Energy and Buildings **35**(9): 863-876.

D. S. Parker, *et al.* (2015). Estimating Daily Domestic Hot-Water Use in North American Homes. ASHRAE Transactions. ASHRAE. Atlanta, ASHRAE. **121**: 258-270.

N. Paul (2016). "Zehn Jahre Bioenergieort - Jühnde 2.0 wird effizienter und flexibler." AKP - Alternative Kommunalpolitik **1**(2016).

S. Peter (2013). Modellierung einer vollständig auf erneuerbaren Energien basierenden Stromerzeugung im Jahr 2050 in autarken, dezentralen Strukturen. CLIMATE CHANGE. UBA. Dessau-Roßlau.

F. A. Peuser, *et al.* (2008). Solarthermie-2000, Teilprogramm 2 und Solarthermie2000plus. Wissenschaftlich-technische Programmbegleitung und Messprogramm (Phase 3) - Teil I (veröffentlichter Teil): Wissenschaftlich-technische Ergebnisse. Hilden, ZfS–Rationelle Energietechnik GmbH.

N. Pflugradt and U. Muntwyler (2017). "Verbraucherverhalten durchschauen." bulletin.ch **3**(2017): 66-69.

N. D. Pflugradt (2016). Modellierung von Wasser und Energieverbräuchen in Haushalten. Doktor-Ingenieur, Technische Universität Chemnitz.

- S. P. Philipps, *et al.* (2017). Technologiebericht 1.3 Photovoltaik innerhalb des Forschungsprojekts TF_Energiewende. Technologien für die Energiewende. Teilbericht 2 an das Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi). I. Wuppertal Institut, IZES. Wuppertal, Karlsruhe, Saarbrücken, Wuppertal Institut, ISI, IZES.
- P.-P. Pichler, *et al.* (2017). "Reducing Urban Greenhouse Gas Footprints." Scientific Reports **7**(1): 14659.
- C. Prinz (2010). Zukunftsweisende Stadtplanung durch Photovoltaik: Das Potential der Solarenergie in der Stadt. Hamburg, Diplomica Verlag GmbH.
- D. Prinz (1999). Städtebauliches Entwerfen. Stuttgart, Berlin, Köln, Kohlhammer.
- projects energy gmbh (2009). Studie zum Biomassepotential in der Freien und Hansestadt Hamburg. Hamburg, Landwirtschaftskammer Hamburg (Hrsg.), Behörde für Stadtentwicklung und Umwelt der Freien und Hansestadt Hamburg (Hrsg.).
- S. J. Quan (2016). Density and energy performance of solar powered buildings in the urban context. Doctor, Georgia Institute of Technology.
- V. Quaschnig (2015). Regenerative Energiesysteme :Technologie - Berechnung - Simulation; mit ... 119 Tab. München, Hanser.
- T. Quested and H. Johnson (2009). Household food and drink waste in the UK: Final report. Banbury, Wastes & Resources Action Programme (WRAP).
- J. L. Ramírez-Mendiola, *et al.* (2017). "The diversity of residential electricity demand – A comparative analysis of metered and simulated data." Energy and Buildings **151**: 121-131.
- C. Ratti, *et al.* (2005). "Energy consumption and urban texture." Energy and Buildings **37**(7): 762-776.
- T. Raussen, *et al.* (2014). Bio- und Grünguterfassung in Deutschland - Übersicht, Systeme und Optimierungsansätze. 26. Kasseler Abfall- und Bioenergieforum 2014: Bio- und Sekundärrohstoffverwertung IX - stofflich - energetisch. K. Wiemer, M. Kern and T. Raussen. Kassel.
- T. Raussen and J. Wagner (2015). Erarbeitung einer umsetzungsorientierten Konzeption für die energetische Verwertung holzartiger Biomasse aus dem Aufgabengebiet des Altmarkkreises Salzwedel. Witzenhausen, Witzenhausen-Institut für Abfall, Umwelt und Energie GmbH.
- F. Reusswig, *et al.* (2014). Machbarkeitsstudie Klimaneutrales Berlin 2050. Potsdam/Berlin.

F. Richter, *et al.* (2017). Optimierung der Biogasausbeute durch effiziente Erfassung und Vergärung von Nahrungs- und Küchenabfällen in Deutschland (Bio-OPTI). Witzenhausen.

U. Rindelhardt, *et al.* (1998). Langzeituntersuchungen an netzgekoppelten Photovoltaikanlagen in Sachsen. Dresden, Forschungszentrum Rossendorf.

P. Rode, *et al.* (2014). CITIES AND ENERGY: Urban Morphology and Heat Energy Demand. London, LSE Cities - The London School of Economics and Political Science und European Institute for Energy Research EIFER, Universität Karlsruhe.

S. v. Roon, *et al.* (2014). Statusbericht zum Standardlastprofilverfahren Gas. München, Forschungsgesellschaft für Energiewirtschaft mbH (FfE).

J. Rosenbauer (2011). Save Food Studie - Das Wegwerfen von Lebensmitteln - Einstellungen und Verhaltensmuster. Präsentation, TheConsumerView GmbH.

U. Roth, *et al.* (1984). Rationelle Energieverwendung in der Bauleitplanung. Bonn, Bundesministerium für Raumordnung, Bauwesen und Städtebau. **Städtebauliche Forschung, Heft 03.102.**

RWI (2011a). Erstellung der Anwendungsbilanz 2008 für den Sektor Private Haushalte. Essen, Rheinisch-Westfälisches Institut für Wirtschaftsforschung (RWI).

RWI (2011b). Erstellung der Anwendungsbilanzen 2009 und 2010 für den Sektor Private Haushalte. Essen, Rheinisch-Westfälisches Institut für Wirtschaftsforschung RWI.

RWI (2012). Erstellung der Anwendungsbilanzen 2010 und 2011 für den Sektor Private Haushalte. Essen, Rheinisch-Westfälisches Institut für Wirtschaftsforschung.

RWI (2013). Erstellung der Anwendungsbilanzen 2011 und 2012 für den Sektor Private Haushalte. Essen, Rheinisch-Westfälisches Institut für Wirtschaftsforschung (RWI).

R. Sabrowski (2015). Das Abfallwirtschaftskonzept für die Landeshauptstadt Wiesbaden 2015. Erlenbach am Main, SHC Sabrowski-Hertrich-Consult GmbH.

SAENA (k.A.). Solarthermiehäuser - Heizen mit der Sonne. Dresden, SAENA Sächsische Energieagentur GmbH.

A. Salvati, *et al.* (2017). "Effects of urban compactness on the building energy performance in Mediterranean climate." Energy Procedia **122**: 499-504.

J. J. Sarralde, *et al.* (2015). "Solar energy and urban morphology: Scenarios for increasing the renewable energy potential of neighbourhoods in London." Renewable Energy **73**: 10-17.

- J. Scheffler (2002). Bestimmung der maximal zulässigen Netzanschlussleistung photovoltaischer Energiewandlungsanlagen in Wohnsiedlungsgebieten. Doktoringenieur, Technischen Universität Chemnitz.
- M. Scheftelowitz, *et al.* (2015). Stromerzeugung aus Biomasse (Zwischenbericht 2015). Leipzig, Deutsches Biomasseforschungszentrum gemeinnützige GmbH (DBFZ).
- A. Schenke and R. Croy (2007). Verbundprojekt: Systemuntersuchung großer solarthermischer Kombianlagen : Analyse und Evaluierung großer Kombianlagen zur Trinkwassererwärmung und Raumheizung ; Abschlussbericht zum BMU-Vorhaben ; (Oktober 2003 bis Dezember 2006), Steinbeis-Transferzentrum Solar- Und Wärmetechnik (Stuttgart), Rationelle Energietechnik GmbH (Hilden).
- G. Schiller (2010). Kostenbewertung der Anpassung zentraler Abwasserentsorgungssysteme bei Bevölkerungsrückgang. DEU Berlin, Rhombos-Verl. **51**: 254.
- M. Schmitt and I. Seidl (2006). "Der Einfluss des Bodenpreisniveaus auf die Bebauungsdichte von Wohnareal." Raumforschung und Raumordnung **64**(2): 93-103.
- O. Schnur (2014). Quartiersforschung: Zwischen Theorie und Praxis, VS Verlag für Sozialwissenschaften.
- F. Schröder, *et al.* (2011). "Universelle Energiekennzahlen für Deutschland - Teil 4: Spezifischer Heizenergieverbrauch kleiner Wohnhäuser und Verbrauchshochrechnung für den Gesamtwohnungsbestand." Bauphysik **33**(4): 243-253.
- F. Schröder, *et al.* (2009). "Universelle Energiekennzahlen für Deutschland – Teil 1: Differenzierte Kennzahlverteilungen nach Energieträger und wärmetechnischem Sanierungsstand." Bauphysik **31**(6): 393-402.
- W. Schulz, *et al.* (2007). Materialienband - Verwertung von Wärmeüberschüssen bei landwirtschaftlichen Biogasanlagen. Bremen, bremer energie institut (BEI), Institut für Umweltverfahrenstechnik (Universität Bremen).
- D. Schulze (1996). Sanierungsgrundlagen Plattenbau - Wohnbauten in Fertigteilbauweise (Baujahre 1958-1990). Berlin, Institut für Erhaltung und Modernisierung von Bauwerken e.V. (IEMB).
- B. Schulze Darup (2009). Energieeffiziente Wohngebäude. Stuttgart, Fraunhofer IRB Verlag.
- P. Schumacher, *et al.* (2016). „Masterplan 100 % Klimaschutz“ – Frankfurt am Main (Generalkonzept Kurzfassung). Frankfurt am Main, Fraunhofer-IBP, Fraunhofer-ISE und KEEA.

K. Schüßler (2001). Kennwerte für Wärmeverteilnetze in Wohngebäuden. Diplom, Fachhochschule Braunschweig/Wolfenbüttel.

G. Schwarz (1989). Allgemeine Siedlungsgeographie: Tl 1: Die ländlichen Siedlungen. Die zwischen Land und Stadt stehenden Siedlungen. Berlin / New York, Walter De Gruyter Incorporated.

F. Seefeldt, *et al.* (2012). Datenbasis zur Bewertung von Energieeffizienzmaßnahmen 2008 (Auswertung für 2007) CLIMATE CHANGE. Dessau-Roßlau, Umweltbundesamt. **06/2012**.

S. Siedentop, *et al.* (2006). Siedlungsentwicklung und Infrastrukturfolgekosten – Bilanzierung und Strategieentwicklung. Leibniz-Institut für ökologische Raumentwicklung e.V. Dresden, Lehrstuhl für Stadttechnik an der BTU Cottbus and Gertz Gutsche Rümenapp GbR Hamburg. Bonn, Bundesamt für Bauwesen und Raumordnung (BBR). **BBR-Online-Publikation Nr. 3/2006**.

Solites, *et al.* (2015). Solare Wärmenetze für Baden-Württemberg - Grundlagen | Potenziale | Strategien, Solites - Steinbeis Forschungsinstitut für solare und zukunftsfähige thermische Energiesysteme, AGFW - Projektgesellschaft für Rationalisierung, Information und Standardisierung mbH, Hamburg Institut Research gemeinnützige GmbH (HIR), Institut für Energiewirtschaft und Rationelle Energieanwendung (IER) und Klimaschutz- und Energieagentur Baden-Württemberg GmbH (KEA).

M. Sonnberger and M. M. Zwick (2016). "Der Energieverbrauch in Privathaushalten soziologisch betrachtet." Soziologie und Nachhaltigkeit - Beiträge zur sozial-ökologischen Transformationsforschung **Ausgabe 2**(2. Jahrgang).

SRU (2011). Wege zur 100 % erneuerbaren Stromversorgung - Sondergutachten. Berlin, Sachverständigenrat für Umweltfragen.

I. Stadler (2014). Energiespeicher: Bedarf, technologien, integration. Berlin, Springer Vieweg.

STALA RLP (2013). Abfallwirtschaft 2011. Statistische Berichte. Bad Ems, Statistisches Landesamt Rheinland-Pfalz.

Statistische Ämter des Bundes und der Länder (2011). Zensus 2011 - Zensusdatenbank. Wiesbaden, Statistische Ämter des Bundes und der Länder.

Statistische Ämter des Bundes und der Länder (2013). Statistik der öffentl.-rechtl. Abfallentsorgung, Aufkommen an Haushaltsabfällen (o.E-altgeräte) - Jahr - regionale Tiefe: Kreise und krfr. Städte. jährlich. Regionaldatenbank Deutschland, Statistische Ämter des Bundes und der Länder (Hrsg.).

Statistische Ämter des Bundes und der Länder (2014a). Statistik der öffentl.-rechtl. Abfallentsorgung, Aufkommen an Haushaltsabfällen (o.E-altgeräte) - Jahr - regionale

Tiefe: Kreise und krfr. Städte. jährlich. Regionaldatenbank Deutschland, Statistische Ämter des Bundes und der Länder (Hrsg.).

Statistische Ämter des Bundes und der Länder (2014b). Zensus 2011: Gebäude und Wohnungen - Übersicht über Merkmale und Merkmalsausprägungen, Definitionen. k. A.

P. Steadman, *et al.* (2013). "Energy and urban built form: an empirical and statistical approach." Building Research & Information **42**(1): 17-31.

J. Stede, *et al.* (2018). Wärmemonitor 2017: Heizenergieverbrauch stagniert, Klimaziel wird verfehlt. DIW Wochenbericht Berlin, Deutsches Institut für Wirtschaftsforschung e.V. **Nr. 39/2018**.

K. Steemers (2003). "Energy and the city: density, buildings and transport." Energy and Buildings **35**(1): 3-14.

B. Stein, *et al.* (2014). Energetische Stadtsanierung – Integriertes Quartierskonzept Mainz-Lerchenberg. Darmstadt, Institut für Wohnen und Umwelt GmbH.

V. Stockinger (2015). Energie+-Siedlungen und -Quartiere :Definition, Planung, Betrieb, Nutzung, Bilanzierung und Bewertung. Stuttgart :, Fraunhofer IRB Verlag.

S. Stöhr-Stojakovic, *et al.* (2015). Energiepotenzialstudie Stadt Bad Krozingen. Freiburg, badenova AG & Co. KG, Freiburg.

L. G. Swan and V. I. Ugursal (2009). "Modeling of end-use energy consumption in the residential sector: A review of modeling techniques." Renewable and Sustainable Energy Reviews **13**(8): 1819-1835.

Techem GmbH (2010). Energiekennwerte - Hilfen für den Wohnungswirt. Eschborn, Techem GmbH.

Techem GmbH (2016). Energiekennzahlen 2016. Eschborn, Techem GmbH.

Techem GmbH (2017). Energiekennzahlen 2017. TRANSPARENZ zum Energieverbrauch für Heizung und Warmwasser in deutschen Mehrfamilienhäusern. Eschborn, Techem GmbH.

A. Tereci, *et al.* (2010). The impact of the urban form on heating, cooling and lighting demand of cities. 1st International Conference on Sustainable Urbanisation, 15-17 September 2010., Hong Kong (China), ICSU.

S. Thalmann, *et al.* (2013). Analyse und Optimierung von Fernwärmenetzen - IST-Analyse von Fernwärmenetzen und Bewertungs-TOOL zur Netzoptimierung. Zürich, ARGE Fernwärme.

D. Thrän, *et al.* (2010). Potenzialanalyse und Handlungsoptionen zur Nutzung von Biomasse auf Recyclingflächen. BMVBS-Online-Publikation, Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung (BMVBS).

T. Tjaden, *et al.* (2015). Repräsentative elektrische Lastprofile für Wohngebäude in Deutschland auf 1-sekündiger Datenbasis. Berlin, HTW Berlin - University of Applied Sciences; Forschungsgruppe Solarspeichersysteme.

M. Todorov (2015). Implementation of solar energy in urban planning. Master, Lund University.

TRION-climate (2012). Energiekennzahlen Oberrhein. Kehl, TRION-climate e.V. - Netzwerk für Energie und Klima.

R. Vallentin (2011). Energieeffizienter Städtebau mit Passivhäusern - Begründung belastbarer Klimaschutzstandards im Wohnungsbau Dissertation, Technische Universität München.

VDI 2067 Wirtschaftlichkeit gebäudetechnischer Anlagen - Nutzenergiebedarf für die Trinkwassererwärmung. Verein Deutscher Ingenieure (VDI). Düsseldorf, Beuth Verlag GmbH. **VDI 2067: 2008 Blatt 12 / Part 12**.

VDI 2067 (2000). Wirtschaftlichkeit gebäudetechnischer Anlagen Nutzenergiebedarf für die Trinkwassererwärmung. VDI-RICHTLINIEN. Düsseldorf, Verein Deutscher Ingenieure (VDI). **VDI 2067: Blatt 12**.

VDI 4655 (2008). Referenzlastprofile von Ein- und Mehrfamilienhäusern für den Einsatz von KWK-Anlagen. Düsseldorf, Verein Deutscher Ingenieure (VDI),. **VDI 4655: 2008**.

VDI 4661 (2003). Energiekenngrößen. Definitionen – Begriffe – Methodik. Verein Deutscher Ingenieure (VDI). Berlin, Beuth-Verlag.

VDI 6002 (2014). Solare Trinkwassererwärmung - Allgemeine Grundlagen Systemtechnik und Anwendung im Wohnungsbau. Düsseldorf, Verein Deutscher Ingenieure (VDI). **6002: 2014 Blatt 1**.

VDI 6007 (2015). Berechnung des instationären thermischen Verhaltens von Räumen und Gebäuden - Modell der solaren Einstrahlung. Düsseldorf, Verein Deutscher Ingenieure (VDI). **VDI 6007 Blatt 3**.

D. Vettorato (2011). Sustainable energy performances of urban morphologies. Doktor, University of Trento.

R. Vogt and H. Fehrenbach (2010). Vergleichende ökologische Bewertung der technischen Trocknung von Holzhackschnitzeln. Heidelberg, ifeu - Institut für Energie- und Umweltforschung Heidelberg GmbH.

H. Voigt (1973). Wertheim-Wartberg :Wohnanlagen am Hang mit Geschößflächenzahl 0,5. Bonn-Bad Godesberg, Bundesminister für Raumordnung, Bauwesen und Städtebau (Hrsg.).

D. Wagner and S. Stöhr-Stojakovic (2015). Energiepotenzialstudie Stadt Waldshut-Tiengen. Freiburg, badenova AG & Co. KG, Freiburg.

J. Wagner, *et al.* (2012). Potenzialstudie über Aufkommen und Behandlung biogener Abfälle im Freistaat Sachsen. Schriftenreihe des LfULG. Heft 10/2012. Dresden, Sächsisches Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie, INTECUS GmbH Abfallwirtschaft und umweltintegratives Management.

D. Walberg, *et al.* (2013). Untersuchung des Wohngebäudebestandes in der Stadt Osnabrück - 2013 - "Masterplan 100% Klimaschutz" - Stadt Osnabrück. Kiel, Arbeitsgemeinschaft für zeitgemäßes Bauen e.V.

D. Walberg, *et al.* (2011). Wohnungsbau in Deutschland - 2011 - Modernisierung oder Bestandsersatz: Studie zum Zustand und der Zukunftsfähigkeit des deutschen „Kleinen Wohnungsbaus“, Arbeitsgemeinschaft für zeitgemäßes Bauen e.V.

WBGU (2008). Welt im Wandel: Zukunftsfähige Bioenergie und nachhaltige Landnutzung. Berlin, Wissenschaftlicher Beirat der Bundesregierung Globale Umweltveränderungen (WBGU).

N. Weiß and M. Krecher (2014). Energiepotenzialstudie Gemeinde Schutterwald. Freiburg, badenova AG & Co. KG.

H. Wendt (2008). "Gereinigt und verstärkt - Biogas für stationäre Brennstoffzellen und zur Netzeinspeisung." BWK Bd. 60(2008): S. 60-66.

J. Weniger, *et al.* (2013). "Optimale Dimensionierung von PV-Speichersystemen." pv magazine 01(2013): 70-75.

J. Weniger, *et al.* (2014). "Sizing of Residential PV Battery Systems." Energy Procedia 46: 78-87.

V. Wesselak and S. Voswinckel (2012). Photovoltaik - Wie Sonne zu Strom wird. Berlin/Heidelberg.

C. Westphal (2008). Dichte und Schrumpfung - Kriterien zur Bestimmung angemessener Dichten in Wohnquartieren schrumpfender Städte aus Sicht der stadttechnischen Infrastruktur, Technischen Universität Dortmund.

J. Widén, *et al.* (2009). "Constructing load profiles for household electricity and hot water from time-use data—Modelling approach and validation." Energy and Buildings 41(7): 753-768.

W. Wimmer, *et al.* (2009). Erstellung eines Logistikkonzepts zur effizienten Sammlung von biogenen Abfällen als Input für eine energetische Nutzung in Biogasanlagen. Berichte aus Energie- und Umweltforschung. 62/2009. Wien, Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie.

J. Winkler, *et al.* (2016). Zukunftswerkstatt Erneuerbare Energien. Eigenversorgung mit Strom Analyse der Wirkungen und Szenarien für die zukünftige Entwicklung. k. A., Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung ISI, CONSENTEC GmbH, BEITEN BURKHARDT Rechtsanwalts-gesellschaft mbH, Zentrum für Sonnenenergie- und Wasserstoff-Forschung

Baden-Württemberg (ZSW).

G. Wirth (1976). Pforzheim-Haidach und Pforzheim-Sonnenhof :wohnl. u. wirtschaftl. Ein- u. Mehrfamilienhaus-Bebauungen. Bonn- Bad Godesberg, Bundesminister für Raumordnung, Bauwesen und Städtebau (Hrsg.).

H. Wirth (2011). Aktuelle Fakten zur Photovoltaik in Deutschland. Freiburg, Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme ISE.

H. Wirth (2012). Aktuelle Fakten zur Photovoltaik in Deutschland. Freiburg, Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme ISE.

H. Wirth (2013). Aktuelle Fakten zur Photovoltaik in Deutschland. Freiburg, Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme ISE.

H. Wirth (2014). Aktuelle Fakten zur Photovoltaik in Deutschland. Freiburg, Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme ISE.

H. Wirth (2015). Aktuelle Fakten zur Photovoltaik in Deutschland. Freiburg, Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme ISE.

Witzenhausen-Institut (2010). Erschließung von energetischen Grünschnittpotenzialen im Landkreis Cochem-Zell. Witzenhausen, Witzenhausen-Institut für Abfall, Umwelt und Energie GmbH.

J. Wojtysiak (2017). Aktueller Begriff: Das „deutlich unter Zwei-Grad“-Ziel - Die Begrenzung der Erderwärmung auf 2 oder sogar 1,5 Grad Celsius. Wissenschaftlichen Dienste. Berlin, Deutscher Bundestag. **Nr. 27/17**.

D. Wolff and K. Jagnow (2011). Überlegungen zu Einsatzgrenzen und zur Gestaltung einer zukünftigen Fern- und Nahwärmeversorgung - Untersuchung von Nah- und Fernwärmenetzen. Wolfenbüttel/Braunschweig.

A. Woyte, *et al.* (2014). Analytical Monitoring of Grid-connected Photovoltaic Systems - Good Practices for Monitoring and Performance Analysis. IEA PVPS. IEA. Erlenbach (Switzerland), International Energy Agency.

S. Wurzbacher (2016). Zum Verhältnis urbaner Bebauungstypen und Energie,
Universitätsbibliothek Wuppertal.

9 Anhang

Tab. 61: Wohngebäude ohne Wohnheime, Wohnungen und Wohnfläche, differenziert nach Baualtersklassen, Gebäudevertreter und Bauweise

Die Gebäude, Wohnungen und Wohnfläche des Gebäudetyps "Anderer Gebäudetyp" wurde der Kategorie Gereiht und damit den Gebäudetypen "Doppelhaushälfte" und "Gereiht" zugeordnet.								
Wohngebäude ohne Wohnheime								
Gebäudevertreter	Bauweise	Baualtersklassen						Insgesamt
		Vor 1919	1919 - 1948	1949 - 1978	1979 - 1995	1996 bis 2000	2001 bis 2010	
mit 1-2 WE	Freistehend	584	646	2.121	733	210	332	4.626
	Gereiht	243	367	1.396	769	247	359	3.381
mit 3-6 WE	Freistehend	112	61	198	87	27	18	503
	Gereiht	240	142	379	59	26	10	856
mit 7-12 WE	Freistehend	18	13	49	32	13	6	131
	Gereiht	15	28	206	58	24	3	334
mit 13+ WE	Freistehend	6	0	10	14	3	3	36
	Gereiht	3	0	19	44	13	6	85
								9.952
Wohnungen								
Gebäudevertreter	Bauweise	Baualtersklassen						Insgesamt
		Vor 1919	1919 - 1948	1949 - 1978	1979 - 1995	1996 bis 2000	2001 bis 2010	
mit 1-2 WE	Freistehend	665	707	2.445	871	234	364	5.286
	Gereiht	324	415	1.531	856	254	354	3.734
mit 3-6 WE	Freistehend	409	218	776	379	130	83	1.995
	Gereiht	830	564	1.605	267	118	43	3.427
mit 7-12 WE	Freistehend	110	64	457	213	111	78	1.033
	Gereiht	157	174	1.715	590	228	25	2.889
mit 13+ WE	Freistehend	83	0	253	207	150	83	776
	Gereiht	45	0	435	904	216	142	1.742
								20.882
Wohnfläche (100 m ²)								
Gebäudevertreter	Bauweise	Baualtersklassen						Insgesamt
		Vor 1919	1919 - 1948	1949 - 1978	1979 - 1995	1996 bis 2000	2001 bis 2010	
mit 1-2 WE	Freistehend	806	841	3.133	1.155	335	580	6.849
	Gereiht	337	442	1.629	995	333	490	4.226
mit 3-6 WE	Freistehend	396	185	596	308	101	72	1.658
	Gereiht	794	482	1.170	200	91	41	2.778
mit 7-12 WE	Freistehend	78	59	387	145	82	66	816
	Gereiht	125	133	1.369	434	159	22	2.243
mit 13+ WE	Freistehend	74	0	185	149	114	72	594
	Gereiht	45	0	303	503	113	111	1.075
								20.238
Eigene Bearbeitung der Daten. Quelle: Zensus 2011; © Statistische Ämter des Bundes und der Länder, 2014								

Tab. 62: Wohnungen nach Art des Gebäudes, Größe des privaten Haushalts und weitere Merkmale (ohne Wohnungen in Wohnheimen)

Auszählungsergebnis aus der Gebäude- und Wohnungszählung

	Insgesamt	1 Person	2 Personen	3 Personen	4 Personen	5 Personen	6 und mehr Personen
Insgesamt	19.297	7.380	6.474	2.692	1.919	570	262
Unter 40	877	790	57	21	3	6	0
40 - 59	2.390	1.688	529	112	48	9	4
60 - 79	4.049	2.003	1.354	449	183	(39)	21
80 - 99	3.661	1.266	1.445	515	326	(75)	34
100 - 119	2.656	682	1.036	501	294	(116)	(27)
120 - 139	2.473	496	924	481	415	110	(47)
140 - 159	1.426	215	536	286	284	(60)	(45)
160 - 179	705	103	230	(139)	(155)	(49)	29
180 - 199	500	74	(190)	76	104	40	16
200 und mehr	560	(63)	173	112	(107)	(66)	39
Insgesamt	6.644	1.288	2.461	1.267	1.139	329	(160)
Unter 40	15	6	6	3	0	0	0
40 - 59	(112)	(67)	28	7	10	0	0
60 - 79	(354)	(142)	(124)	43	(35)	4	6
80 - 99	775	212	(319)	(130)	81	(16)	17
100 - 119	1.295	295	515	252	(167)	(57)	9
120 - 139	1.674	288	632	342	300	77	35
140 - 159	1.117	147	422	225	245	(39)	(39)
160 - 179	505	(50)	153	(121)	(123)	(49)	(9)
180 - 199	341	37	128	(52)	83	31	10
200 und mehr	456	(44)	134	92	(95)	(56)	35
Insgesamt	1.858	714	675	248	(148)	51	22
Unter 40	59	49	7	3	0	0	0
40 - 59	208	(140)	(62)	3	3	0	0
60 - 79	388	191	(121)	(54)	16	6	0
80 - 99	363	136	(133)	(62)	29	0	3
100 - 119	270	(77)	112	35	28	15	3
120 - 139	258	(63)	100	(41)	(34)	14	6
140 - 159	(130)	(37)	56	18	7	9	3
160 - 179	(87)	15	(35)	12	22	0	3
180 - 199	44	3	22	10	6	3	0
200 und mehr	(51)	(3)	27	10	(3)	4	4
Insgesamt	4.984	2.198	1.673	642	332	94	45
Unter 40	209	180	23	3	0	3	0
40 - 59	830	579	173	51	17	6	4
60 - 79	1.557	745	547	176	(71)	9	9
80 - 99	1.148	386	460	177	98	23	4
100 - 119	604	165	252	116	(43)	22	6
120 - 139	362	(77)	(133)	(74)	62	10	6
140 - 159	131	28	40	32	19	12	0
160 - 179	(57)	16	(18)	(3)	10	0	10
180 - 199	(54)	12	21	0	9	6	6
200 und mehr	32	10	6	10	3	3	0

Bei den ausgewiesenen Wohnungszahlen sind gewerblich genutzte Wohnungen und Wohnungen in bewohnten Unterkünften nicht, Diplomatenwohnungen/Wohnungen ausländischer Streitkräfte nur bei alleiniger Auswertung nach „Art des Gebäudes“ berücksichtigt.

Die relativen Ergebnisse beziehen sich auf die Gesamtzahl der Wohnungen der jeweiligen regionalen Einheit je betrachtetem Wohnungsmerkmal. Die relativen Werte wurden durch Division von Ergebnissen nach Durchführung der Geheimhaltung errechnet.

© Statistische Ämter des Bundes und der Länder, 2014
 Vervielfältigung und Verbreitung mit Quellenangabe gestattet.
Fortsetzung Tabelle

Auszählungsergebnis aus der Gebäude- und Wohnungszählung

	Insgesamt	1 Person	2 Personen	3 Personen	4 Personen	5 Personen	6 und mehr Personen
Insgesamt	3.602	1.717	1.147	384	239	(84)	31
Unter 40	(157)	145	(3)	9	0	0	0
40 - 59	705	480	172	35	15	3	0
60 - 79	1.198	584	411	120	57	20	6
80 - 99	982	362	377	(114)	(93)	30	6
7 - 12 Wohnun- gen	320	83	102	67	40	19	9
120 - 139	103	(25)	33	21	15	9	0
140 - 159	39	0	15	11	10	0	3
160 - 179	35	16	12	0	0	0	7
180 - 199	(51)	22	16	7	6	0	0
200 und mehr	12	0	6	0	3	3	0
Insgesamt	2.209	1.463	518	(151)	(61)	12	4
Unter 40	437	410	18	3	3	3	0
40 - 59	535	422	94	16	3	0	0
60 - 79	552	341	(151)	(56)	(4)	0	0
80 - 99	393	(170)	156	32	25	6	4
13 und mehr Wohnungen	(167)	62	55	(31)	16	3	0
120 - 139	(76)	43	26	3	4	0	0
140 - 159	(9)	3	3	0	3	0	0
160 - 179	21	6	12	3	0	0	0
180 - 199	10	0	3	7	0	0	0
200 und mehr	9	6	0	0	3	0	0

Bei den ausgewiesenen Wohnungszahlen sind gewerblich genutzte Wohnungen und Wohnungen in bewohnten Unterkünften nicht, Diplomatenwohnungen/Wohnungen ausländischer Streitkräfte nur bei alleiniger Auswertung nach „Art des Gebäudes“ berücksichtigt.

Die relativen Ergebnisse beziehen sich auf die Gesamtzahl der Wohnungen der jeweiligen regionalen Einheit je betrachtetem Wohnungsmerkmal. Die relativen Werte wurden durch Division von Ergebnissen nach Durchführung der Geheimhaltung errechnet.

© Statistische Ämter des Bundes und der Länder, 2014
 Vervielfältigung und Verbreitung mit Quellenangabe gestattet.

Tab. 63: Wohnungen nach Art des Gebäudes, Größe des privaten Haushalts und Wohnflächen-Klassen (ohne Wohnungen in Wohnheimen)

Wohngebäude mit	Wohnflächen-Klassen (20m ² Schritte)	Größe des privaten Haushalts						
		Insgesamt	1	2	3	4	5	6 und mehr
1-2 Wohnungen	Insgesamt	8.502	2.002	3.136	1.515	1.287	380	182
	Unter 40	74	55	13	6	0	0	0
	40 - 59	320	207	90	10	13	0	0
	60 - 79	742	333	245	97	51	10	6
	80 - 99	1.138	348	452	192	110	16	20
	100 - 119	1.565	372	627	287	195	72	12
	120 - 139	1.932	351	732	383	334	91	41
	140 - 159	1.247	184	478	243	252	48	42
	160 - 179	592	65	188	133	145	49	12
	180 - 199	385	40	150	62	89	34	10
200 und mehr	507	47	161	102	98	60	39	
3 und mehr Wohnungen	Insgesamt	10.795	5.378	3.338	1.177	632	190	80
	Unter 40	803	735	44	15	3	6	0
	40 - 59	2.070	1.481	439	102	35	9	4
	60 - 79	3.307	1.670	1.109	352	132	29	15
	80 - 99	2.523	918	993	323	216	59	14
	100 - 119	1.091	310	409	214	99	44	15
	120 - 139	541	145	192	98	81	19	6
	140 - 159	179	31	58	43	32	12	3
	160 - 179	113	38	42	6	10	0	17
	180 - 199	115	34	40	14	15	6	6
200 und mehr	53	16	12	10	9	6	0	

Eigene Bearbeitung der Daten. Quelle: Zensus 2011; © Statistische Ämter des Bundes und der Länder, 2014

Tab. 64: Haushaltsgröße (Anzahl der Personen) in Wohngebäuden mit bis zu 2 Wohnungen und 3 und mehr Wohnungen differenziert nach Wohnungsgröße (in 20 m²-Intervallen).

Flächenklassen der Wohnungen (in m ²)	1 und 2 Wohnungen	3 und mehr Wohnungen	Insgesamt
Unter 40	1,34	1,13	1,15
40 - 59	1,47	1,39	1,40
60 - 79	1,90	1,73	1,76
80 - 99	2,19	2,03	2,08
100 - 119	2,37	2,28	2,34
120 - 139	2,61	2,37	2,56
140 - 159	2,74	2,71	2,73
160 - 179	2,95	2,65	2,90
180 - 199	2,91	2,50	2,82
200 und mehr	3,23	2,57	3,17

Eigene Bearbeitung der Daten. Quelle: Zensus 2011; © Statistische Ämter des Bundes und der Länder, 2014

Tab. 65: Haushaltsgröße nach Flächenklassen von Wohnungen und Häufigkeit der Wohnungen in den Flächenklassen (in 20 m²-Intervallen).

Flächenklassen der Wohnungen	1 und 2 Wohnungen			3 und mehr Wohnungen		
	Haushaltsgröße	Häufigkeit der Wohnungen	Häufigkeit der Wohnungen (kumuliert)	Haushaltsgröße	Häufigkeit der Wohnungen	Häufigkeit der Wohnungen (kumuliert)
Unter 40	1,34	1%	1%	1,13	8%	8%
40 - 59	1,47	4%	5%	1,39	19%	27%
60 - 79	1,90	9%	15%	1,73	31%	58%
80 - 99	2,19	13%	28%	2,03	23%	81%
100 - 119	2,37	18%	46%	2,28	10%	91%
120 - 139	2,61	22%	69%	2,37	5%	96%
140 - 159	2,74	14%	83%	2,71	2%	97%
160 - 179	2,95	7%	90%	2,65	1%	98%
180 - 199	2,91	4%	94%	2,50	1%	99%
200 und mehr	3,23	6%	100%	2,57	1%	100%

Eigene Bearbeitung der Daten. Quelle: Zensus 2011; © Statistische Ämter des Bundes und der Länder, 2014