Fraunhofer ISI

FRAUNHOFER-INSTITUT FÜR SYSTEM- UND INNOVATIONSFORSCHUNG ISI

JAN STEINBACH

MODELLBASIERTE UNTERSUCHUNG VON POLITIK-INSTRUMENTEN ZUR FÖRDERUNG ERNEUERBARER ENERGIEN UND ENERGIEEFFIZIENZ IM GEBÄUDEBEREICH

FRAUNHOFER VERLAG

Fraunhofer-Institut für
System- und Innovationsforschung ISI

Jan Steinbach

Modellbasierte Untersuchung von Politikinstrumenten zur Förderung erneuerbarer Energien und Energieeffizienz im Gebäudebereich

FRAUNHOFER VERLAG

Kontaktadresse:
Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung ISI
Breslauer Straße 48
76139 Karlsruhe
Telefon 0721 6809-0
Telefax 0721 689152
E-Mail info@isi.fraunhofer.de
URL www.isi.fraunhofer.de

D 90

Zugl.: Karlsruhe, KIT, Diss., 2015

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek
Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über http://dnb.d-nb.de abrufbar.
ISSN: 1612-7455
ISBN: 978-3-8396-0987-3

Druck: Mediendienstleistungen des
Fraunhofer-Informationszentrum Raum und Bau IRB, Stuttgart

Für den Druck des Buches wurde chlor- und säurefreies Papier verwendet.

© by FRAUNHOFER VERLAG, 2016
Fraunhofer-Informationszentrum Raum und Bau IRB
Postfach 80 04 69, 70504 Stuttgart
Nobelstraße 12, 70569 Stuttgart
Telefon 0711 970-2500
Telefax 0711 970-2508
E-Mail verlag@fraunhofer.de
URL http://verlag.fraunhofer.de

Alle Rechte vorbehalten

Dieses Werk ist einschließlich aller seiner Teile urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung, die über die engen Grenzen des Urheberrechtsgesetzes hinausgeht, ist ohne schriftliche Zustimmung des Verlages unzulässig und strafbar. Dies gilt insbesondere für Vervielfältigungen, Übersetzungen, Mikroverfilmungen sowie die Speicherung in elektronischen Systemen.
Die Wiedergabe von Warenbezeichnungen und Handelsnamen in diesem Buch berechtigt nicht zu der Annahme, dass solche Bezeichnungen im Sinne der Warenzeichen- und Markenschutz-Gesetzgebung als frei zu betrachten wären und deshalb von jedermann benutzt werden dürften.
Soweit in diesem Werk direkt oder indirekt auf Gesetze, Vorschriften oder Richtlinien (z.B. DIN, VDI) Bezug genommen oder aus ihnen zitiert worden ist, kann der Verlag keine Gewähr für Richtigkeit, Vollständigkeit oder Aktualität übernehmen.

Modellbasierte Untersuchung von Politikinstrumenten zur Förderung erneuerbarer Energien und Energieeffizienz im Gebäudebereich

Zur Erlangung des akademischen Grads eines

Doktors der Wirtschaftswissenschaften

(Dr. rer. pol.)

bei der Fakultät für Wirtschaftswissenschaften

des Karlsruher Instituts für Technologie (KIT)

genehmigte

DISSERTATION

von

Dipl. Wi.-Ing. Jan Steinbach

Tag der Abgabe: 19.01.2015

Tag der mündlichen Prüfung: 29.06.2015

Referent: Prof. Dr. Frank Schultmann

Korreferent: apl. Prof. Dr. Martin Wietschel

Danksagung

Diese Doktorarbeit ist im Rahmen meiner Forschungs- und Projektarbeit am Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung ISI in Karlsruhe entstanden. Während dieser Zeit hatte ich das Glück, eine Vielzahl von Menschen aus verschiedenen Forschungseinrichtungen kennenzulernen, die mich unterstützt und inspiriert haben. Das Anfertigen dieser Arbeit wäre ohne die kollegiale Zusammenarbeit und die vielen anregenden Diskussionen nicht möglich gewesen.

Besonderer Dank gilt meinem Doktorvater, Herrn Professor Dr. Frank Schultmann, für die kollegiale Betreuung meiner Arbeit. Des Weiteren danke ich Herrn Professor Dr. Martin Wietschel für die Übernahme des Korreferats.

Mein herzlicher Dank gilt Dr. Mario Ragwitz und Dr. Barbara Breitschopf für ihr Vertrauen und die Möglichkeit, in einem hochinteressanten Forschungsbereich mit viel Gestaltungsspielraum und spannenden Projekten zu arbeiten. Ganz besonderen Dank möchte ich auch an Dr. Lukas Kranzl, Dr. Andreas Müller und Marcus Hummel von der Technischen Universität Wien aussprechen für die großartige Zusammenarbeit in der Energiesystemmodellierung. Ich danke auch ganz herzlich Dr. Veit Bürger vom Öko-Institut in Freiburg für die wertvollen Diskussionen über energiepolitische Instrumente und die hervorragende Zusammenarbeit.

Meinen Kollegen am Fraunhofer ISI möchte ich für die motivierenden Gespräche, ihre Kollegialität und Freundschaft danken. Stellvertretend möchte ich erwähnen: Benjamin Pfluger für die vielen guten Ideen und die lustige Zeit im gemeinsamen Büro, Judit Kockat, die mir in entscheidenden Phasen die Arbeitsbelastung in der Projektarbeit abgenommen hat, Miriam Schöfer und Brigitte Mastel für das Korrekturlesen dieser Arbeit. Ein besonderer Dank gilt Lucas Lürich, der mich als Hiwi über einen langen Zeitraum mit viel Einsatz sehr unterstützt hat.

Ganz besonders möchte ich auch meinen Eltern und meiner Schwester für ihre unentwegte Unterstützung danken. Ein großer Dank geht auch an meine Freundin Sina für ihre Geduld, ihr Verständnis und die Unterstützung während der Erstellung der Doktorarbeit.

Inhaltsverzeichnis

1 Einleitung und Motivation 1

1.1 Ausgangslage und Problemstellung 1

1.2 Zielsetzung und Vorgehensweise 2

2 Charakterisierung der Wärmebereitstellungen und der Akteure im Gebäudebereich 4

2.1 Einführung 4

2.2 Charakterisierung des Wärmebereichs 4

2.2.1 Energieträgereinsatz in der Wärmebereitstellung 4

2.2.2 Wärmeversorgungstechnologien 6

2.2.3 Energetische Bewertung von Gebäuden und Energieeffizienzmaßnahmen 11

2.3 Strukturierung der Akteure und der Investitionsprozesse im Gebäudebereich 16

2.3.1 Relevante Akteure und deren Beziehungen 16

2.3.2 Gliederung der Investoren im Gebäudebereich 18

2.3.3 Investorenspezifische Hemmnisse und Entscheidungskalküle 20

3 Politikmaßnahmen zur Förderung erneuerbarer Energien und Energieeffizienz in Gebäuden 24

3.1 Einführung 24

3.2 Kategorisierung von Politikinstrumenten 24

3.3 Derzeitiger Rechts- und Förderrahmen in Deutschland und Europa 25

3.3.1 Europapolitische Vorgaben und Ziele 25

3.3.2 Ziele der Bundesregierung 27

3.3.3 Politikinstrumente zur Förderung von Energieeffizienz und erneuerbaren Energien in Deutschland 29

3.3.4 Ordnungsrechtliche Förderinstrumente 30

3.3.5 Finanzielle Förderinstrumente 33

3.4 Vorschläge zur Weiterentwicklung und Ausweitung bestehender Politikinstrumente ... 39
3.4.1 Ausgestaltungsvarianten bestehender Instrumente ... 39
3.4.2 Optionen zur haushaltsunabhängigen Förderung von EE-Wärme ... 40
3.4.3 Optionen zur haushaltsunabhängigen Förderung von Energieeffizienzmaßnahmen ... 42
3.4.4 Steuerliche Abschreibung von Energieeffizienzmaßnahmen ... 43

4 Modelle zur Abbildung des Energiebedarfs und der Investitionsentscheidungen im Gebäudebereich ... 45

4.1 Einführung ... 45
4.2 Methoden der Investitionsrechnung zur Beurteilung von Effizienzmaßnahmen und Wärmeversorgungsystemen ... 46
4.2.1 Klassifizierung der Investitionsarten ... 46
4.2.2 Klassifizierung der Investitionsentscheidungen ... 47
4.2.3 Methoden zur Bewertung von Wahlentscheidungen ... 48
4.3 Klassifizierung von Energiesystemmodellen für den Gebäudebereich ... 52
4.3.1 Ermittlung des Gebäudeenergiebedarfs ... 54
4.3.2 Energienachfrageentwicklung und Technologiewahl ... 57
4.3.3 Synthese zu den Modellansätzen ... 58
4.4 Modellierung des Investitionsentscheidungsverhaltens ... 59
4.4.1 Simulation der Technologiewahl in bestehenden Energiesystemmodellen für den Gebäudebereich ... 59
4.4.2 Discrete-Choice-Analyse ... 62
4.4.3 Sozio-psychologische Modelle ... 66
4.4.4 Heuristische Entscheidungsfindung ... 69
4.4.5 Agentenbasierte Modellierung ... 70
4.5 Auswahl eines Modellansatzes für die weitere Analyse ... 74

5 Modellierung der Wärmenachfrage im Gebäudebereich unter Berücksichtigung von individuellem Entscheidungsverhalten ... 76

5.1 Einführung 76

5.2 Modellüberblick 76

5.3 Energiebedarfsmodul; Berechnung des Raumwärme- und Warmwasserbedarfs 77

5.3.1 Berechnung des Nutz- und Endenergiebedarfs 78

5.3.2 Parametrisierung der Nutzereinflüsse 81

5.4 Lebensdauer-Modul: Abriss und Austausch von Gebäudekomponenten 82

5.5 Erweiterung zur Modellierung der Investoren und des Investitionsverhaltens 84

5.5.1 Investorenspezifische Wahrnehmung 86

5.5.2 Kriterien und Strategien der Investitionsentscheidung 88

5.5.3 Simulation der Technologiewahl 97

5.5.4 Modellierung von Politikinstrumenten 102

5.6 Ermittlung der Eingangsdaten für die Modellsimulation 108

5.6.1 Gebäudetypologische Bestimmung der Referenzgebäudesegmente 109

5.6.2 Verfügbarkeit leitungsgebundener und biogener Energieträger 113

5.6.3 Definition der Investorenagenten 114

5.6.4 Wärmeversorgungstechnologien in der Modellsimulation 120

5.6.5 Effizienzmaßnahmen in der Modellsimulation 120

5.6.6 Referenzklima und Temperaturbereinigung 124

5.6.7 Kalibrierung und Abgleich der Eingangsdaten mit der Energiebilanz 125

5.7 Validierung der Modellsimulation 128

5.7.1 Validierung der Marktentwicklung dezentraler Wärmeerzeuger 129

5.7.2 Validierung der Endenergiebedarfsentwicklung 131

5.7.3 Validierung der Sanierungsaktivität 132

6 Analyse der Wirkung von Politikinstrumenten auf die Entwicklung des Energiebedarfs und die Entwicklung erneuerbarer Wärme 133

6.1 Einführung 133

6.2 Externe Rahmenbedingungen der Szenarien 133
6.2.1 Energiepreisentwicklung 133
6.2.2 Entwicklung des Gebäudebestandes 134
6.2.3 Entwicklung des Fernwärmepotentials in Abhängigkeit der Politikszenarien 135
6.2.4 Entwicklung im Bereich der Prozesswärme 136
6.3 Beschreibung der untersuchten Politikszenarien für den Gebäudebereich 137
6.3.1 Frozen Policy: Fortschreibung der derzeitigen Politik 138
6.3.1 Maßnahmenbündel Ordnungsrecht 139
6.3.2 Maßnahmenbündel haushaltsabhängige Förderung 141
6.3.3 Maßnahmenbündel haushaltsunabhängige Förderung 142
6.4 Ergebnisse der Szenarien 143
6.4.1 Ergebnisse des Frozen-Policy-Szenarios 143
6.4.2 Politikszenarien: Ordnungsrecht 153
6.4.3 Politikszenarien: Haushaltsabhängige Förderung 155
6.4.4 Politikszenarien: Haushaltsunabhängige Förderung 158
6.5 Bewertung der Szenarienergebnisse 162
6.6 Sensitivitätsanalyse 169

7 Schlussfolgerung und Ausblick 172
7.1 Schlussfolgerung zur Modellentwicklung 172
7.2 Schlussfolgerung aus der Analyse der Politikinstrumente zur Förderung von EE-Wärme und Energieeffizienzmaßnahmen 174
7.3 Kritische Würdigung und Ausblick 176

8 Zusammenfassung 178

Anhang 183

Literaturverzeichnis 197

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Energetische Abgrenzung des für diese Arbeit relevanten Anteils des Wärmebereichs 5

Abbildung 2: Entwicklung der EE Wärmebereitstellung 6

Abbildung 3: Bestand an Wärmeerzeugern in Wohngebäuden 7

Abbildung 4: Marktentwicklung dezentraler Wärmeerzeuger 8

Abbildung 5: Spezifische Investitionen dezentraler Wärmeerzeuger 9

Abbildung 6: Spezifische Wärmebereitstellungskosten typischer Referenztechnologien 10

Abbildung 7: Spezifische Wärmebereitstellungskosten auf Vollkostenbasis für unterschiedliche Versorgungsfälle unter Berücksichtigung von Förderung 11

Abbildung 8: Energetische Bilanzierungsebenen für die Untersuchung des Gebäudebereichs 13

Abbildung 9: Wärmedurchgangskoeffizient bei nachträglicher Dämmung opaker Bauteile 14

Abbildung 10: Spezifische Investitionen von Effizienzmaßnahmen an der Gebäudehülle 15

Abbildung 11: Anteil der ohnehin anfallenden Investitionen an den gesamten spezifischen Investitionen der energetischen Sanierung von Außenwänden und Dach 16

Abbildung 12: Darstellung der Akteursbeziehungen im Gebäudebereich 18

Abbildung 13: Darstellung des Zielsystems des Energiekonzeptes und der Zielgrößen 28

Abbildung 14: Hauptinstrumente zur Förderung von EE-Wärme und Energieeffizienz in Gebäuden in Deutschland 29

Abbildung 15: Anforderungen an neue und bestehende Gebäude durch die Energieeinsparverordnung 31

Abbildung 16: Fördervolumen MAP 2006 bis 2012 35

Abbildung 17: Anzahl geförderter EE-Wärmeerzeuger im Programmteil der BafA 36

Abbildung 18: Übersicht der Förderfälle in den KfW-Programmen zur energetischen Gebäudesanierung und Bauen in Anzahl Wohneinheiten 38

Abbildung 19: Klassifizierung der Investitionsentscheidung von Energieeffizienzmaßnahmen an der Gebäudehülle 48

Abbildung 20: Klassifizierung von Energiesystemmodellierung für den Gebäudesektor 53

Abbildung 21: Theoretisches Modell von Michelsen und Madlener (2010) zur Beschreibung der Investitionsentscheidung von Wärmeversorgungssystemen basierend auf der *Theory of Planned Behavior* 69

Abbildung 22: Simulation der Technologiewahl im *agentenbasierten* Modell von Sopha (2011) 74

Abbildung 23. Schematische Darstellung des Modells INVERT/EE-Lab 77

Abbildung 24: Darstellung der Energiebedarfsberechnung 78

Abbildung 25: Simulationsablauf eines Zeitschritts in INVERT/EE-Lab zum Stand in (Kranzl et al. 2013; Müller and Biermayr 2011) 85

Abbildung 26: Simulationsablauf eines Zeitschritts nach der Modellerweiterung im Rahmen dieser Arbeit 85

Abbildung 27: Schematische Darstellung der Energieträgerpreis-Wahrnehmung implementiert in *Invert-Agents* 90

Abbildung 28: Ergebnisse der Expertenbefragung zum Komfortnutzen von Wärmeversorgungssystemen 96

Abbildung 29: Gruppierung der Wärmeversorgungssysteme zur Berechnung der Marktanteile mittels des Nested-Logit-Modells 101

Abbildung 30: Schematische Darstellung der Modellierung von Politikinstrumenten in *Invert-Agents* 103

Abbildung 31: Modelltechnische Umsetzung der haushaltsunabhängigen Förderung des Portfoliomodells 106

Abbildung 32: Definition der Referenzgebäudesegmente für Deutschland 110

Abbildung 33: U-Werte der Nichtwohngebäudeklassen 113

Abbildung 34: Regionale Verfügbarkeit von Erdgas- und Fernwärmenetz 114

Abbildung 35: Kriteriengewichtung in der Klasse der selbstnutzenden Eigentümer 116

Abbildung 36: Kriteriengewichtung der Vermieter, Wohnungsgesellschaften, Eigentümergemeinschaften und Nichtwohngebäude Eigentümer 118

Abbildung 37: Referenzklima der Modellsimulation und Heizgradtage für Temperaturbereinigung 124

Abbildung 38: Vergleich des Endenergiebedarfs nach Energiebilanz und der *Bottom-up*-Modellsimulation 126

Abbildung 39: Vergleich Energieträgeraufteilung nach Energiebilanz und nach *Bottom-up*-Modellsimulation 127

Abbildung 40: Vergleich erneuerbare Energien Statistik und *Bottom-up*-Modellsimulation 128

Abbildung 41: Abweichung zwischen historischen Marktanteilen und Modellsimulation 131

Abbildung 42: Vergleich zwischen realer Entwicklung des Wärmeendenergiebedarfs nach Energiestatistik und Modellergebnis 132

Abbildung 43: Energiepreisentwicklung für die Modellsimulation 134

Abbildung 44: Entwicklung der Wohnfläche und der Wohnungsanzahl 135

Abbildung 45: Energieträgerentwicklung in der Fernwärmeversorgung 136

Abbildung 46: Entwicklung des Wärmebedarfs im Industriesektor und der GHD-Prozesse 137

Abbildung 47: Entwicklung des Wärmeendenergiebedarfs im *Frozen-Policy*-Szenario 144

Abbildung 48: Entwicklung der EE-Wärme im *Frozen-Policy-Szenario* 145

Abbildung 49: Gewählte Sanierungsmaßnahmen und Neubaustandards im *Frozen-Policy-Szenario* 146

Abbildung 50: Kumulierte und durchschnittliche Investitionen für Effizienzmaßnahmen auf Vollkostenbasis im Frozen-Policy-Szenario 147

Abbildung 51: Installierte Wärmeversorgungssysteme bis 2020 148

Abbildung 52: Kumulierte Marktanteile der primäre Wärmeversorgungssysteme bis 2020 gegliedert nach Investorenagenten 149

Abbildung 53: Anteile der einzelnen Investorenagenten an den Gesamtinstallationen bis 2020 je Technologie 150

Abbildung 54: Investitionen in die Wärmeversorgungen 2008 bis 2020 151

Abbildung 55: Öffentliche Investitionszuschüsse der KfW-Programme zu Gebäudesanierung und effizientem Neubau im Frozen-Policy-Szenario 152

Abbildung 56: Öffentliche Investitionszuschüsse in die Wärmeversorgung 153

Abbildung 57: Ordnungsrecht: Rückgang Wärmeendenergie und EE-Wärme im Vergleich zu *Frozen Policy* 154

Abbildung 58: Differenz der bis 2020 installierten Anlagen zum *Frozen-Policy*-Szenario bei Ausweitung der EE-Wärme-Nutzungspflicht 155

Abbildung 59: Haushaltsabhängige Förderung: Rückgang Wärmeendenergie und EE-Wärme im Vergleich zu Frozen Policy 156

Abbildung 60: Zusätzlich induzierte Investitionen und zusätzliche Fördermittel in Energieeffizienzmaßnahmen im Vergleich zum *Frozen-Policy*-Szenario 157

Abbildung 61: Differenz der kumulierten Investitionen und Zuschüsse in EE-Wärmetechnologien im Vergleich zum *Frozen-Policy*-Szenario..... 157

Abbildung 62: Haushaltsunabhängige Förderung: Rückgang Wärmeendenergie und EE-Wärme im Vergleich zu *Frozen Policy* 158

Abbildung 63: Anzahl zusätzlicher EE-Wärmeversorgungssysteme im Vergleich zu Frozen Policy 159

Abbildung 64: Investitionszuschüsse und Strafzahlungen in den gerechneten Varianten des Prämien- und *Portfoliomodells*..... 161

Abbildung 65: Effektivität der untersuchten Maßnahmenbündel hinsichtlich der Energiewendeziele für den Wärmebereich bis 2020 164

Abbildung 66: Energie- und Betriebskosten des gesamten Gebäudebereichs 165

Abbildung 67: Gesamte Investitionen im Simulationszeitraum 166

Abbildung 68: Vergleich der gesamt- und einzelwirtschaftlichen Differenzkosten 168

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Differenzierung der Investoren in der Gruppe der Eigentümer Eigennutzer ... 21

Tabelle 2: Handlungsmotive der Investoren in der Gruppe Eigentümer Eigennutzer ... 22

Tabelle 3: Mindestnutzungsanteile für EE im Neubau und alternative Maßnahmen nach EEWärmeG ... 33

Tabelle 4: Geförderte Anlagen im Rahmen des MAP ... 34

Tabelle 5: Fördertatbestände des KfW-Programms Energieeffizient Sanieren ... 37

Tabelle 6: Wichtige Ausgestaltungsparameter und -varianten bestehender Politikinstrumente ... 39

Tabelle 7: Ausgestaltungsparameter steuerlicher Förderung von Energieeffizienzmaßnahmen ... 44

Tabelle 8: Discrete-Choice-Fallstudien für den Bereich der Wärmeversorgung und der Energieeffizienz in Gebäuden ... 65

Tabelle 9: Parameter des Entscheidungsmodells für private Akteure im *agentenbasierten* Modell von Wittmann (2008) ... 73

Tabelle 10: Im Modell implementierte Entscheidungskriterien ... 88

Tabelle 11: Gliederungssystematik für die Gebäudeklassen ... 111

Tabelle 12: Einteilung der Gebäudeklassen für den Nichtwohngebäudebereich ... 112

Tabelle 13: Anteile der im Modell definierten Investoreninstanzen an den Gebäudekategorien ... 115

Tabelle 14: Parametrisierung der investorenspezifischen Wahrnehmung ... 119

Tabelle 15: Entscheidungsvariablen im Investitionsberechnungsmodell ... 121

Tabelle 16: Verwendete Parameter im Investitions-Berechnungsmodell ... 122

Tabelle 17: Vergleich der Simulationsergebnisse mit durchschnittlichen historischen Marktdaten der Jahre 2009 bis 2011 ... 130

Tabelle 18: Ausgestaltung der modellierten Kerninstrumente im *Frozen-Policy*-Szenario ... 138

Tabelle 19: Modellierte Politikvarianten im Maßnahmenbündel Ordnungsrecht 140

Tabelle 20: Modellierte Politikvarianten im Maßnahmenbündel haushaltsabhängige Förderung 141

Tabelle 21: Modellierte Politikvarianten im Maßnahmenbündel haushaltsunabhängige Förderung 143

Tabelle 22: Einfluss der Energiepreissteigerung aller Energieträger für die Jahre 2012 bis 2020 169

Tabelle 23: Einfluss der Energiepreissteigerung fossiler Energieträger für die Jahre 2012 bis 2020 170

Tabelle 24: Einfluss der Energiepreissteigerung biogener Energieträger für die Jahre 2012 bis 2020 171

Abkürzungen

BafA	Bundesamt für Ausfuhrkontrolle
BHKW	Blockheizkraftwerk
CDA	Conditional Demand Analysis
EE	Erneuerbare Energien
EEWärmeG	Erneuerbare-Energien-Wärmegesetz
EnergieStG	Energiesteuergesetzt
EnEV	Energieeinsparverordnung
EZFH	Ein- und Zweifamilienhaus
GHD	Gewerbe, Handel, Dienstleistung
GMFH	Großes Mehrfamilienhaus
H_T'	Transmissionswärmetransferkoeffizient
IBM	Individuen basierte Modellierung
KfW	Kreditanstalt für Wiederaufbau
KMFH	Kleines Mehrfamilienhaus
KWK	Kraft-Wärme-Kopplung
MAP	Marktanreizprogramm
MAS	Multiagentensysteme
MMFH	Mittleres Mehrfamilienhaus
NWG	Nichtwohngebäude
Q_p	Primärenergiebedarf
RH	Reihen- und Doppelhaus
THG	Treibhausgasemissionen

1 Einleitung und Motivation

1.1 Ausgangslage und Problemstellung

Im Laufe der letzten Jahrzehnte ist die Diskussion um die überwiegend auf fossilen und nuklearen Energieträgern beruhende Energieversorgung in den Industrieländern mehr und mehr in das öffentliche Bewusstsein gerückt. Auslöser dafür sind Ereignisse wie z. B. die „erste Ölkrise“ Anfang der 1970er Jahre oder der Reaktorunfall in Tschernobyl. Hinzu kommen langfristige Überlegungen über die Auswirkungen der Nutzung dieser Energietechnologien: Das Endlagerproblem bei der Atomkraft, die Ressourcenverknappung fossiler Brennstoffe bei gleichzeitig steigender Nachfrage sowie die Verstärkung des natürlichen Treibhauseffektes durch anthropogene Verbrennungsprozesse und der daraus resultierende Klimawandel. Seit der Gründung des *Intergovernmental Panel on Climate Change* (IPCC) und der Klimarahmenkonferenz der Vereinten Nationen 1992 steht das Thema Klimaschutz und damit die Frage nach einer nachhaltigen Energieversorgung auf der internationalen politischen Agenda.

Auf europäischer Ebene wurden die sogenannten „20-20-20“ Ziele formuliert. Diese sehen vor, dass in der Europäischen Union bis 2020 die Treibhausgasemissionen um 20 Prozent gegenüber dem Niveau von 1990 reduziert werden, die Energieeffizienz um 20 Prozent gesteigert wird und der Anteil erneuerbarer Energien an der Energiebereitstellung in der Europäischen Union 20 Prozent erreichen wird (Europäische Kommission 2008).

Ein deutlicher Ausbau erneuerbarer Energien (EE) hat in Deutschland in den letzten Jahren insbesondere im Bereich der Stromversorgung stattgefunden. Deren Anteil an der Stromerzeugung ist seit dem Jahr 2000 um 17,4 Prozentpunkte gestiegen (AGEE-Stat 2013). Im Wärmebereich ist der Anteil EE im selben Zeitraum lediglich um 8.9 Prozentpunkte gestiegen. Die Bereitstellung von Wärmeenergie stellt jedoch gemessen am Endenergiebedarf den größten Verbrauchssektor dar, wobei alleine die Versorgung von Gebäuden mit Raumwärme und Warmwasser rund 30 Prozent am gesamten Endenergiebedarf in Deutschland ausmacht (AGEB et al. 2012).

Mit den Beschlüssen des *Energiekonzepts* und der *Energiewende* sind erstmals Ziele für diesen Sektor definiert worden, die bis zum Jahr 2020 einen Anteil von 14 Prozent EE an der Wärmeversorgung und gegenüber 2008 einen Rückgang des Wärmeendenergiebedarfs von 20 Prozent bis zum Jahr 2020 vorsehen (BMU and BMWI 2011; EEWärmeG 2011). Es besteht daher ein verstärktes Interesse der Politik an der Entwicklung und Bewertung von Instrumenten zur Förderung von EE im Wärmebereich und zur Senkung des Energiebedarfs in Gebäuden.

Da es sich beim Wärmebereich überwiegend um eine dezentrale Erzeugungsstruktur mit privaten Investoren handelt, gilt es, teilweise andere Diffusionshemmnisse als im Stromsektor zu überwinden. Dieser Umstand erfordert ein Verständnis der involvierten Akteure und Investitionsprozesse. Um die Potentiale hinsichtlich des Ausbaus von EE und der Steigerung der Energieeffizienz zu realisieren, sind effektive Strategien nötig, die ein Verständnis der unterschiedlichen Hemmnisse und Treiber im Wärmebereich voraussetzen.

1.2 Zielsetzung und Vorgehensweise

Das Ziel dieser Arbeit besteht darin, Strategien für den Ausbau erneuerbarer Energien und die Diffusion von Energieeffizienzmaßnahmen im Gebäudesektor zu bewerten. Dabei sollen explizit die unterschiedlichen Verhaltensweisen der Investoren und bestehenden Hemmnisse im Gebäudebereich berücksichtigt und die Wirkungen unterschiedlicher Politikinstrumente quantitativ bis zum Jahr 2020 untersucht werden. Dazu wird ein modellbasierter Ansatz gewählt, für den sich aus der Zielsetzung folgende Anforderungen ergeben:

- Abbildung des deutschen Gebäudebestandes und der relevanten Wärmeversorgungstechnologien in einer hohen Differenzierung hinsichtlich der technischen und ökonomischen Parameter
- Abbildung individueller Investitionsprozesse sowie der bestehenden Hemmnisse und fördernden Faktoren für Energieeffizienzmaßnahmen und EE-Wärme
- Explizite Abbildung bestehender und in der Literatur diskutierter Politikinstrumente zur Förderung von Energieeffizienz und EE-Wärme

Zur Erreichung der Zielsetzung wird die Arbeit folgendermaßen strukturiert:

Kapitel 2 grenzt den für diese Arbeit relevanten Bereich des Energiesystems ab. Die Technologien zur Bereitstellung von Wärme und Energieeffizienzmaßnahmen in Gebäuden werden dargestellt und die relevanten Akteure identifiziert. Kapitel 3 gibt einen Überblick über den derzeitigen Rechts- und Förderrahmen für EE-Wärme und Energieeffizienz in Gebäuden in Deutschland und der EU. Dabei werden die wichtigsten Ausgestaltungsparameter der Politikinstrumente ermittelt und Optionen zur Weiterentwicklung der energiepolitischen Rahmenbedingung diskutiert. Diese dienen als Grundlage für die Definition der Politikszenarien in der Modellsimulation.

Anschließend werden in Kapitel 4 Energiesystemmodelle zur Abbildung des Energiebedarfs und der Investitionsentscheidungen im Gebäudebereich vorgestellt und klassifiziert. Defizite der bestehenden Ansätze werden diskutiert und daraus die Forschungs-

lücke herausgearbeitet. Darauf aufbauend wird ein Modellierungsansatz für diese Arbeit abgeleitet.

Kapitel 5 stellt das in dieser Arbeit entwickelte Simulationsmodell vor, welches auf einem bestehenden Modell aufsetzt. Nach dem Überblick über die vorhandenen Module wird die in dieser Arbeit durchgeführte Modellerweiterung vorgestellt. Dabei wird insbesondere auf die Abbildung der Investoren und spezifischen Hemmnisse eingegangen sowie die mathematische Formulierung des agentenbasierten Simulationsansatzes zur Technologiewahl dargestellt. Die Ableitung relevanter Eingangsdaten und der dazu entwickelten Ansätze werden im zweiten Teil beschrieben. Das Kapitel schließt mit einer Validierung anhand eines Vergleiches mit historischen Daten zur Marktentwicklung von Wärmeversorgungssystemen und der Entwicklung des Endenergiebedarfs.

Die Anwendung des Modells zur Analyse der Wirkungen von Politikinstrumenten erfolgt in Kapitel 6. Darin werden zunächst energiepolitische Maßnahmenbündel und Ausgestaltungsvarianten verschiedener Politikinstrumente definiert, die in Szenarien bis zum Jahr 2020 modelliert werden. Die Ergebnisse werden im Vergleich zu einer Referenzentwicklung hinsichtlich ihrer Effektivität und Effizienz bewertet. Der Einfluss der Energiepreisentwicklung auf die Ergebnisse wird in Sensitivitätsrechnungen im letzten Teil des Kapitels analysiert.

Die zentralen Schlussfolgerungen aus der entwickelten Methodik und den Ergebnissen der Szenarienrechnungen werden in Kapitel 7 dargestellt. Die Arbeit schließt mit einer kritischen Würdigung und dem Ausblick auf Anknüpfungspunkte für weiteren Forschungsbedarf.

2 Charakterisierung der Wärmebereitstellungen und der Akteure im Gebäudebereich

2.1 Einführung

Das folgende Kapitel grenzt den für diese Arbeit relevanten Bereich des Energiesystems ab. Die Wärmenachfrage und Wärmebereitstellung in Gebäuden wird anhand des Energieträgereinsatzes, der Bestands- und Marktentwicklung relevanter Versorgungstechnologien sowie der Maßnahmen zur Reduktion des Energiebedarfs charakterisiert. Der zweite Teil identifiziert die relevanten Akteure und deren Beziehungen untereinander und gibt einen Überblick zu den aus der Literatur bekannten spezifischen Hemmnissen und Entscheidungsprozessen der Investoren im Gebäudebereich.

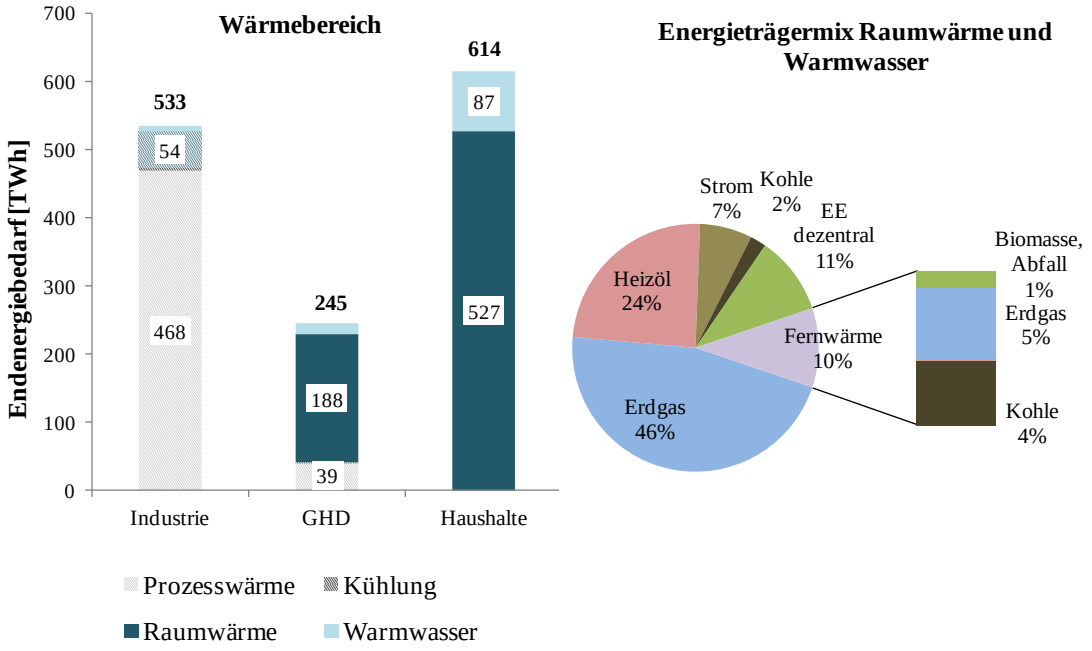
2.2 Charakterisierung des Wärmebereichs

Der Endenergiebedarf im Wärmebereich lässt sich einerseits entsprechend der Verbrauchssektoren in Industrie, Gewerbe, Handel und Dienstleistungen (GHD) sowie Private Haushalte gliedern. Anderseits ist eine Differenzierung auch nach den Anwendungsbereichen Raumwärme, Warmwasser und Prozesswärme möglich (BDEW 2008). Eine exakte Abgrenzung ist jedoch in beiden Gliederungsvarianten nicht immer möglich. So wird beispielsweise der Endenergieverbrauch im Falle von gemischt genutzten Gebäuden meist nur einem Sektor zugerechnet. Eine weitere Gliederung, wie sie in den gesamtwirtschaftlichen Energiebilanzen vorgenommen wird, ist die Unterscheidung nach Primärenergieträgern (AGB 2009). Für eine technoökonomische Analyse mit dem Ziel, energiepolitische Empfehlungen abzuleiten erscheint es hingegen sinnvoll, den Wärmebereich disaggregiert von der Nachfrageseite zu betrachten. Entsprechend der unterschiedlichen Bedarfsausprägungen – Temperaturniveau, benötigte Leistung, Energiemenge etc. – kann eine Differenzierung in Gebäude- und Prozessbereich vorgenommen werden. Abbildung 1 stellt den Endenergiebedarf des Wärmebereichs dar und grenzt den für diese Arbeit relevanten Anteil ab. Der Untersuchungsrahmen dieser Arbeit beschränkt sich auf den Gebäudebereich, der die Anwendungsbereiche Raumwärme und Warmwasser in Gebäuden der Sektoren Private Haushalte (Wohngebäude) sowie GHD (Nichtwohngebäude) enthält.

2.2.1 Energieträgereinsatz in der Wärmebereitstellung

Die Wärmeversorgung im Gebäudebereich wird zu knapp 90 Prozent über dezentrale, gebäudeintegrierte Technologien bereitgestellt. Die große Mehrheit der Wärmeversorgungssysteme befindet sich somit im Besitz der Gebäudeeigentümer auf der Nachfrageebene. Der größte Anteil der Wärmenachfrage wird durch Erdgas befeuerte Anlagen

gedeckt, gefolgt von Heizöl, die zusammen 85 Prozent[1] des Wärmeendenergiebedarfs[2] ausmachen. Kohle ist kaum noch von Bedeutung in der dezentralen Wärmeversorgung, ist jedoch ein relevanter Energieträger in der Fernwärmeversorgung und im Prozesswärmebereich. Strombasierte Wärmeversorgung hat einen Anteil von rund 7 Prozent am Wärmeendenergiebedarf, wobei der Anteil konventioneller Stromheizungen abnimmt, während elektrische Wärmepumpen wachsende Marktanteile verzeichnen, insbesondere in neuen Gebäuden (BDH 2012; StaBuA 2011)



Schraffierte Bereiche sind nicht Bestandteil dieser Arbeit

Quelle: Eigene Darstellung; Endenergiebedarf des Jahres 2010; (AGEB et al. 2012; AGFW 2011)

Abbildung 1: Energetische Abgrenzung des für diese Arbeit relevanten Anteils des Wärmebereichs

Erneuerbare Energien haben einen Anteil von 10,4 Prozent[3] an der gesamten Wärmebereistellung, wobei über 90 Prozent davon durch die Verbrennung fester Biomasse bereitgestellt wird (Abbildung 2). Auch wenn der Marktanteil moderner Biomasse-Zentralheizungskessel seit dem Jahr 2000 kontinuierlich gewachsen ist (DEPV 2009,

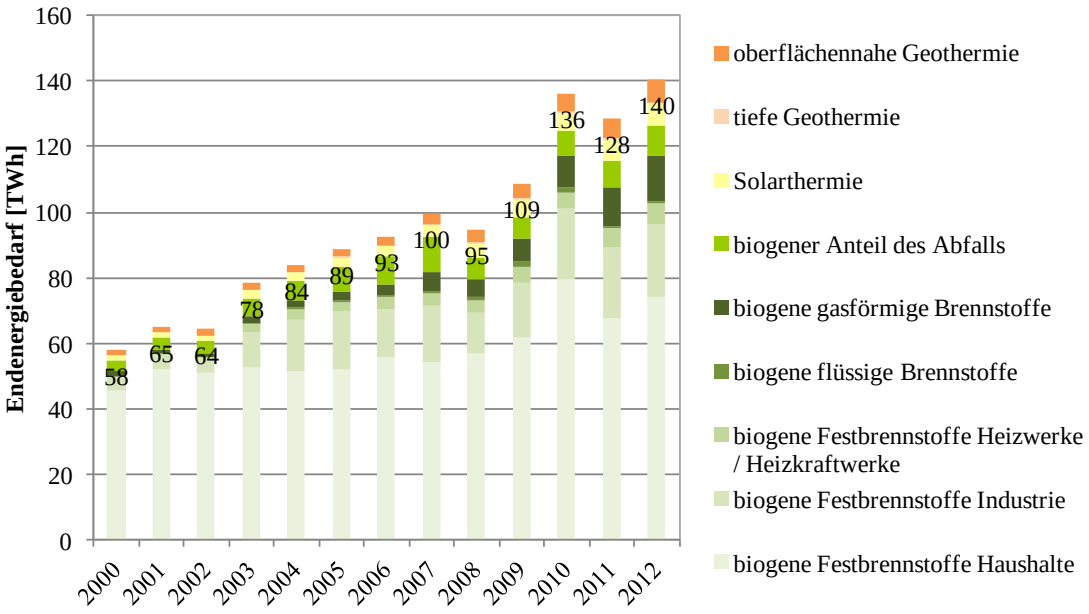
---

1 Inklusive Erdgas und Heizöl zur Bereitstellung von Fernwärme.

2 Im Folgenden wird der Begriff „Wärmeendenergiebedarf“ anstelle von Endenergiebedarf für Raumwärme und Warmwasser verwendet.

3 Inklusive Industriebereich; Stand 2011.

2014), wird ein großer Teil der dezentralen Biomasse immer noch in Öfen- oder Kaminheizungen eingesetzt, die in der Regel als zusätzliche Wärmequelle zu konventionellen auf fossilen basierten Wärmeversorgungssysteme betrieben werden (Breitschopf et al. 2011). Einen starken Zuwachs hat auch der wärmenetzbasierte Einsatz von Biomasse in Heiz- und Heizkraftwerken erfahren. Wärme aus biogenen gasförmigen Brennstoffen wird überwiegend in Kraft-Wärme-Kopplungsanlagen (KWK) in direkter Nähe zu Biogasanlagen erzeugt. Ein weiterer Nutzungspfad besteht in der Aufbereitung zu Biomethan und Einspeisung ins Erdgasnetz. In der Statistik bilanzierte Wärme aus flüssigen biogenen Brennstoffen wird jeweils zur Hälfte dem Industrie- und GHD-Sektor zugeschrieben (AGEB 2010). Die Nutzung erfolgt in KWK-Anlagen (Pflanzenöl-BHWKs), als direkte Verbrennung im Prozesswärmebereich sowie als Beimischung zu konventionellem Heizöl und Vertrieb als Bioheizöl. Die EE-Bereitstellung aus Solarthermie und oberflächennaher Geothermie kann fast ausschließlich der dezentralen Wärmeversorgung in Gebäuden zugeschrieben werden. Mit letzterer wird Erd- und Umweltwärme aus Wärmepumpen bilanziert.



Quelle: Eigene Darstellung; (AGEE-Stat 2013)

Abbildung 2: Entwicklung der EE Wärmebereitstellung

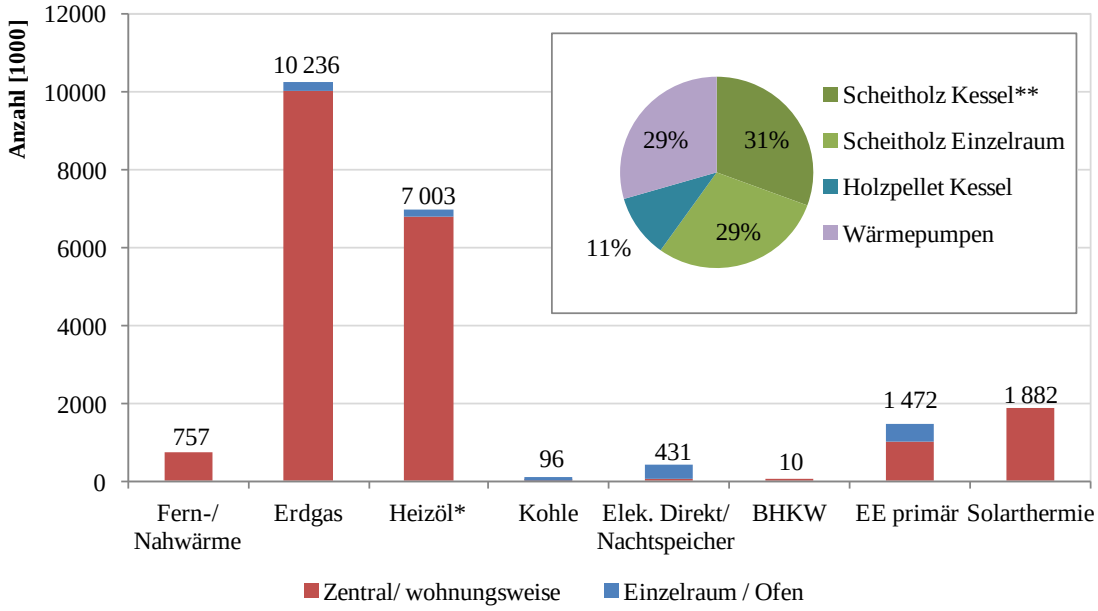
2.2.2 Wärmeversorgungstechnologien

Zur Bereitstellung von Wärme steht eine Vielzahl unterschiedlicher Technologien zur Verfügung, die im Folgenden anhand der Marktsituation und der ökonomischen Einordnung charakterisiert werden. Für eine detaillierte Beschreibung der verschiedenen

Systemvarianten und deren technologischer Parameter sei auf Dengler et al. (2011) sowie die relevanten Normen verwiesen (DIN V 18599-5 2011; DIN V 4701-10 2003).

Marktsituation

Abbildung 3 beschreibt die Marktsituation der unterschiedlichen Wärmeversorgungsysteme mit Bezug auf die Bestandszahlen in Wohngebäuden. Die dominierenden Technologien sind Erdgas- und Heizöl basierte Zentralheizungskessel und Etagenheizungen mit zusammen über 17 Millionen installierten Anlagen. Stromdirekt- und Nachtspeicherheizung haben einen geringen Anteil und Kohleöfen – oder Kohlezentralheizungen – sind kaum noch relevant. Dezentrale Kraft-Wärme-Kopplungsanlagen (BHKW, Mini-/Mikro-KWK) haben ebenfalls noch einen geringen Anteil.



Stand 2009; *inkl. Flüssiggas; **inkl. sonstige Biomasse

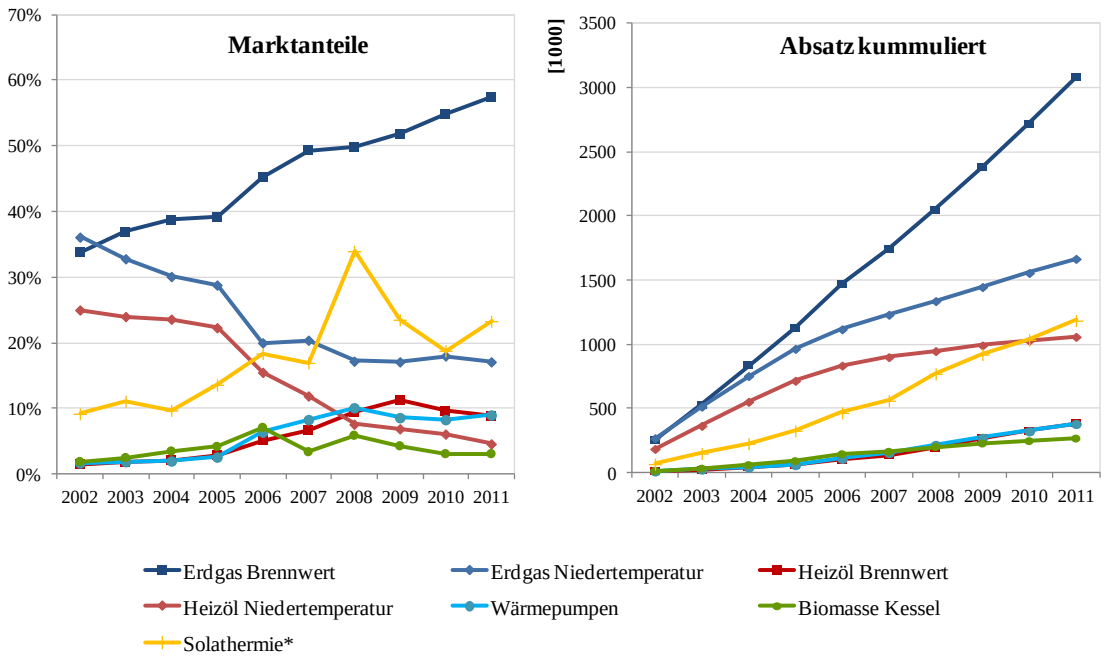
Quelle: Eigene Darstellung; Auswertung basierend auf Datenbankabfrage „Datenbasis Gebäudebestand“ (Diefenbach et al. 2010)

Abbildung 3: Bestand an Wärmeerzeugern in Wohngebäuden

Der Bestand an primären auf erneuerbaren Energien basierenden Wärmeversorgungssystemen beträgt rund 1,5 Million Anlagen. Solarthermieanlagen zur Warmwasserbereitung oder mit Heizungsunterstützung sind in der Regel als sekundäres Wärmeversorgungssystem in Ergänzung zu einem fossilen oder EE-Wärmeerzeuger installiert. Insgesamt sind rund 1,9 Millionen Solarthermieanlagen installiert. Unter den primären EE-Wärmeversorgung sind insgesamt 71 Prozent moderneren Zentralheizungssysteme zuzuschreiben, die durch automatisch beschickte Biomassekessel (Holzpel-

lets, Hackschnitzel), Holzvergaserkessel und Wärmepumpen realisiert sind. Immerhin 29 Prozent der primären EE-Systeme sind jedoch auch Holzöfen zuzuschreiben, die durch direkte Wärmeabgabe an Einzelräume mit geringer Effizienz arbeiten.

Die Entwicklung der Marktanteile macht deutlich, dass sich Erdgas-Brennwertkessel als Standardtechnologie unter den dezentralen Wärmeversorgungssystemen in den letzen 10 Jahren entwickelt haben (Abbildung 4). Die Installation von Heizölkesseln ist insgesamt stark zurückgegangen, wobei auch hier die effiziente Brennwerttechnik einen steigenden Marktanteil verzeichnet hat.



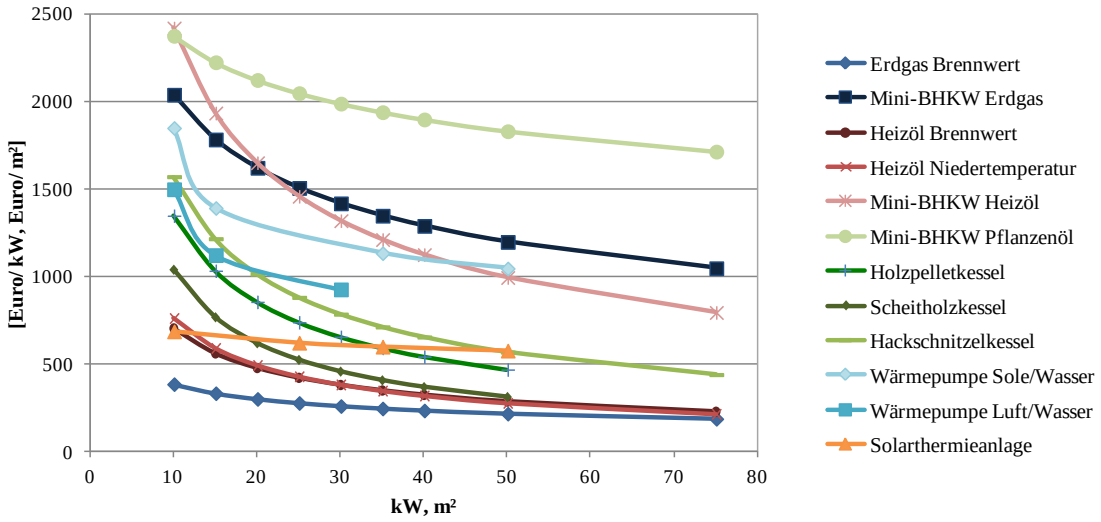
* Anteil am Gesamtabsatz dezentraler Wärmeerzeuger
Quelle: Eigene Darstellung; (BDH 2012)

Abbildung 4: Marktentwicklung dezentraler Wärmeerzeuger

Die Marktanteile der EE-Wärmeversorgungssysteme sind ebenfalls signifikant gestiegen, nicht zuletzt bedingt durch entsprechende öffentliche Förderprogramme (vgl. 3.3.5). Insbesondere Wärmepumpen und Solarthermieanlagen haben seit 2002 eine hohe Steigerung der Verkaufszahlen verzeichnet, wobei die Schwankungen auch auf die Verfügbarkeit der finanziellen Mittel in den entsprechenden Förderprogrammen zurückzuführen sind. Im Neubaubereich werden mittlerweile 30 Prozent der Wohngebäude und 10 Prozent der Nichtwohngebäude mit Wärmepumpen installiert (StaBuA 2013a).

Ökonomische Bewertung

Abbildung 5 vergleicht die spezifischen Investitionen dezentraler Wärmeversorgungssysteme. Diese beinhalten die Ausgaben für Wärmeerzeuger, Einbindung, Wärmequellenerschließung und Installation. EE-Wärmeversorgungssysteme weisen deutlich höhere Investitionen als fossile Wärmeerzeuger auf. Ausnahme sind BHKWs, deren wirtschaftlicher Einsatz nur in Gebäuden mit hoher spezifischer Wärmelast und in der Regel in Kombination mit einem Spitzenlastkessel wirtschaftlich sinnvoll ist, was der Vergleich der Wärmebereitstellungskosten bestätigt (Abbildung 6, Abbildung 7).



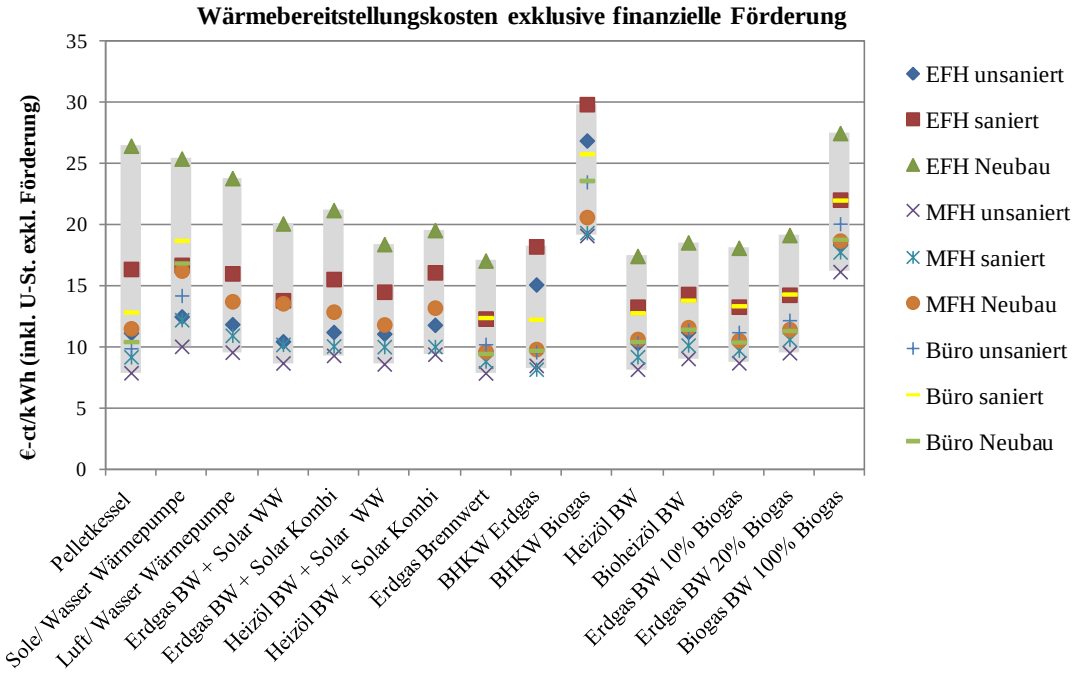
Quelle: Eigene Darstellung; (Dengler et al. 2011)

Abbildung 5: Spezifische Investitionen dezentraler Wärmeerzeuger

Die spezifischen Wärmebereitstellungskosten[4] der unterschiedlichen Technologien für typische Bedarfsfälle – unterschieden nach Gebäudetypen und Sanierungszustand – sind in der folgenden Abbildung dargestellt. In Abbildung 6 sind die Kosten ohne Berücksichtigung der finanziellen Fördermaßnahmen dargestellt. Erdgas-Brennwertkessel weisen in allen Bedarfsfällen die geringsten Wärmebereitstellungskosten auf. Biomassekessel – hier repräsentiert durch den Holzpelletkessel – sind in Gebäuden mit hohem Wärmebedarf die wirtschaftlichste EE-Wärmetechnologie. In Ein- und Zweifamilienhäusern weisen Solarthermieanlagen in Kombination mit fossilen Brennwertkesseln

[4] Mit Wärmebereitstellungskosten werden die spezifischen Jahresvollkosten bezeichnet, die sich aus den kapital-, verbrauchs- und betriebsgebunden Kosten zusammensetzen (vgl. (Breitschopf et al. 2010; VDI 2067-1 2000). Die kapitalgebunden Kosten werden mit einem Zinssatz von 6 Prozent und einer technologischen Lebensdauer von 20 Jahren aus dem Kapitalwert der Investitionen ermittelt.

die höchste Wirtschaftlichkeit gemessen an den Wärmebereitstellungskosten auf[5]. Im Neubau weisen die EE-Wärmeversorgungssysteme deutlich höhere Wärmebereitstellungskosten auf. Allerdings ist die Einbindung der Technologien im Neubau in der Regel einfacher, da Wärmeverteilungssysteme und Peripheriebauteile besser auf die Systeme abgestimmt werden können. Im Gebäudebestand bestehen hingegen oftmals technische und bauliche Restriktionen, die einen Einsatz von EE-Wärmeversorgungssystemen ganz verhindern oder nur mit erheblichen zusätzlichen Investitionen ermöglichen.



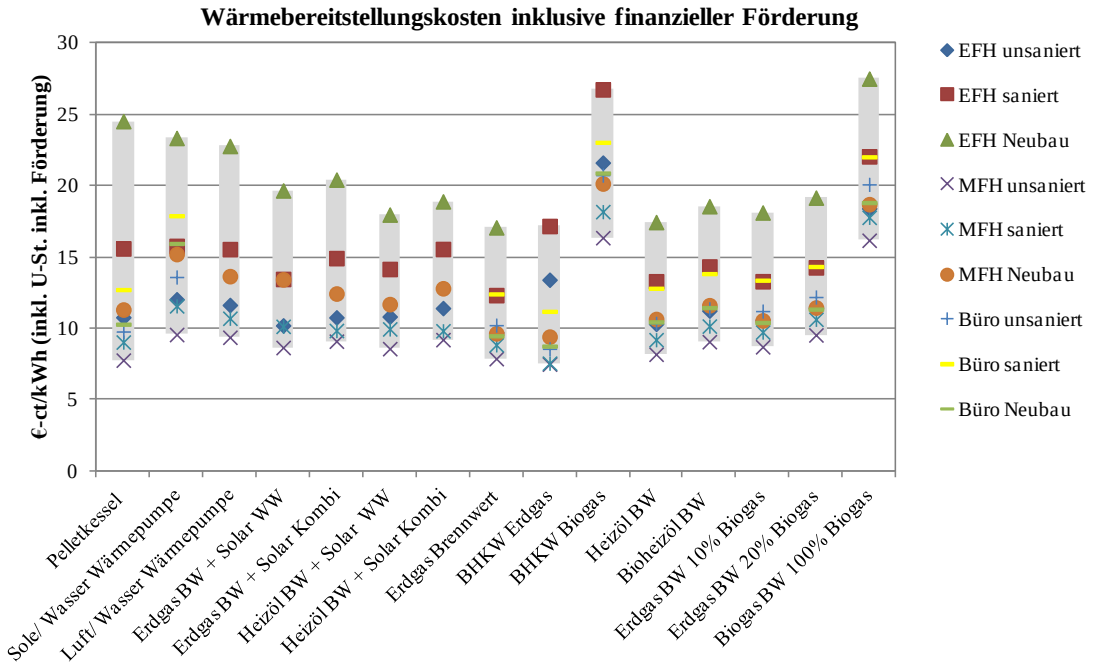
BW: Brennwert; Solar WW: Solarthermieanlage zur Warmwasserbereitung; Solar Kombi: Solarthermieanlage zur Warmwasserbereitung und Heizungsunterstützung
Quelle: Eigene Berechnung, veröffentlicht in (Seefeldt et al. 2011)

Abbildung 6: Spezifische Wärmebereitstellungskosten typischer Referenztechnologien

Unter Berücksichtigung der bestehenden finanziellen Fördermaßnahmen für EE Wärme-Technologien und den Einspeisevergütungen für KWK-Anlagen (vgl. 3.3.3), weist

[5] Die Bezugsgröße im Nenner ist die Summe des Heizwärme- und Warmwasserbedarfs, woraus sich die Wärmebereitstellungskosten aus Sicht eines Investors ergeben. Wird jedoch die bereitgestellte EE-Nutzenergie als Bezug angesetzt, weisen die Solarthermieanlagen die höchsten Wärmebereitstellungskosten nach der BHKW Biogas-Technologie auf.

der Erdgas-Brennwertkessel immer noch die geringsten Wärmebereitstellungskosten auf (Abbildung 7). Im Durchschnitt über alle aufgezeigten Bedarfsfälle ist der Abstand der spezifischen Wärmebereitstellungskosten von fossilen Referenztechnologien und EE-Technologien relativ gering. Ausnahme sind die Technologien mit Bezug von 100 Prozent Biomethan[6], was auf den vergleichsweise hohen Energiepreis von Biomethan zurückzuführen ist (vgl. Seefeldt et al. 2011).



Inklusive finanzielle Zuschüsse über das Marktanreizprogramm; bei BHKWs inklusive KWK-/ EEG-Vergütung und Rückerstattung der Energiesteuer (vgl. 3.3.5)
Quelle: Eigene Berechnung veröffentlicht in (Seefeldt et al. 2011)

Abbildung 7: Spezifische Wärmebereitstellungskosten auf Vollkostenbasis für unterschiedliche Versorgungsfälle unter Berücksichtigung von Förderung

2.2.3 Energetische Bewertung von Gebäuden und Energieeffizienzmaßnahmen

Die Höhe des Wärmebedarfs und das Potential zum Einsatz erneuerbarer Energien sind maßgeblich von den bauphysikalischen und konstruktiven Eigenschaften der ein-

[6] Auf Erdgasqualität aufbereitetes Biogas.

zelnen Gebäude abhängig. Für eine fundierte Untersuchung des Gesamtsystems der Wärmenachfrage und -versorgung ist daher eine Betrachtung der energetischen Parameter auf der Systemebene der Einzelgebäude erforderlich. Dementsprechend erfolgt im Rahmen der quantitativen Analyse dieser Arbeit eine gebäudetypologische Abbildung des Sektors über Referenzgebäude (vgl. 5.6.1). Abbildung 8 verdeutlicht die unterschiedlichen Bilanzierungsebenen und Treiber des Wärmeendenergiebedarfs in Gebäuden. Der Nutzenergiebedarf bilanziert den erforderlichen Energiebedarf, der zur Aufrechterhaltung einer gewünschten Temperatur den Innenräumen oder dem Brauchwasser zugeführt werden. Dieser wird durch das Nutzerverhalten, die energetische Qualität der Gebäudehülle sowie den klimatischen Bedingungen bestimmt. Die Höhe des Endenergiebedarfs hängt zusätzlich noch von technischen Komponenten des Versorgungssystems ab, wie Art und Vorlauftemperatur des Wärmeverteilsystems, Effizienz des Wärmeerzeugers und der Wärmespeicherung. Die Bilanzgrenze bildet dabei der dem Wärmeversorgungssystem bzw. dem Gebäude zugeführte Energiebedarf. In der primärenergetischen Bilanzierung wird zudem der energetische Aufwand einbezogen, der zur Aufbereitung und zum Transport der Energieträger notwendig ist und bereits auf einer vorgelagerten Ebene angefallen ist.

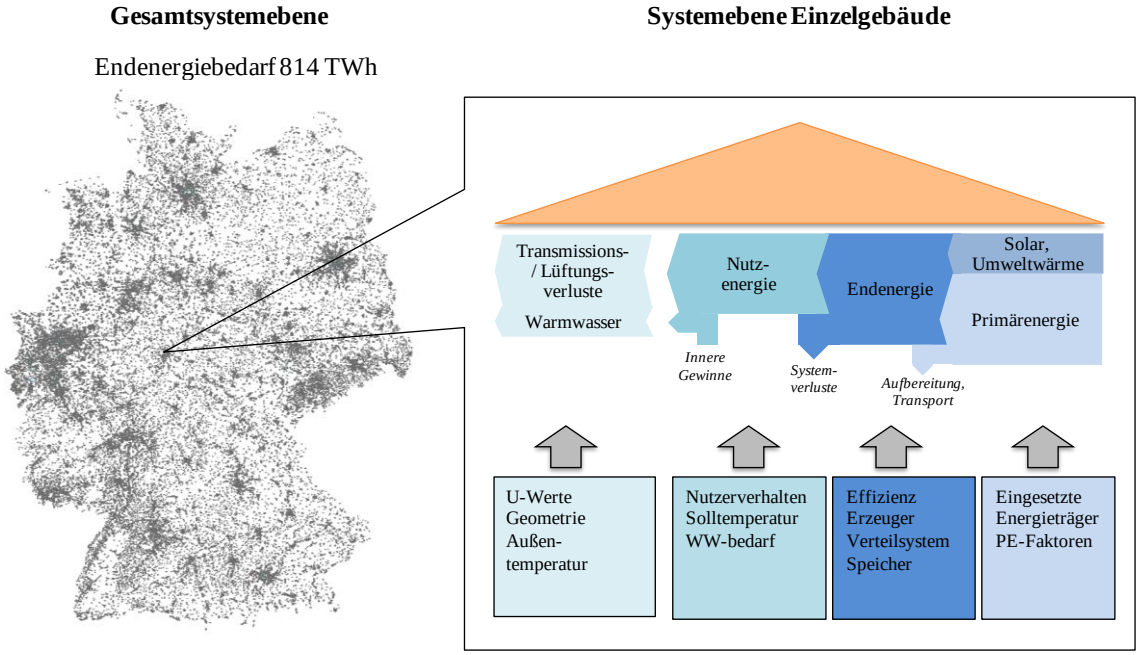
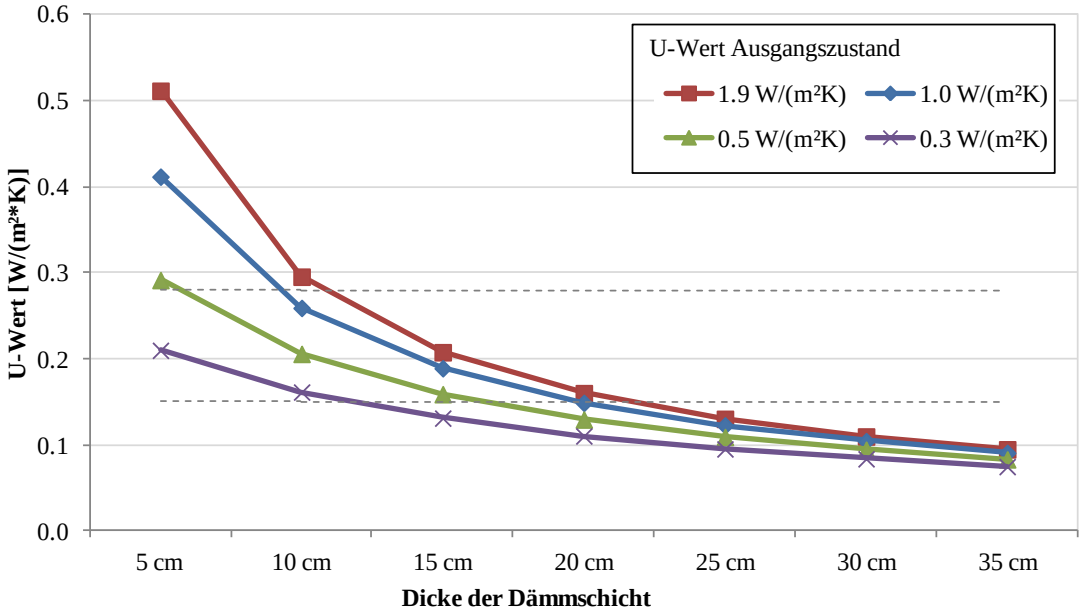


Abbildung 8: Energetische Bilanzierungsebenen für die Untersuchung des Gebäudebereichs

Energieeffizienzmaßnahmen

Zur Beschreibung der Gesamtenergieeffizienz eines Gebäudes stellt der Jahresprimärenergiebedarf eine wichtige Kennzahl dar. Allerdings ist damit noch keine Aussage über die energetische Qualität der Gebäudehülle möglich, da ein niedriger Primärenergiebedarf auch durch Wechsel der Wärmeversorgung auf einen erneuerbaren Energieträger mit niedrigem Primärenergiefaktor erreicht werden kann. Als weitere Kennzahl dient daher der spezifische, „auf die wärmeübertragende Umfassungsfläche bezogene Transmissionswärmeverlust“ (*Ht'*), der die Wärmedurchgangskoeffizienten (U-Werte) der einzelnen Gebäudekomponenten flächengewichtet berücksichtigt (EnEV 2009). Eine Verbesserung dieser Kennzahl lässt sich durch Dämmung oder Austausch der Gebäudekomponenten erreichen. Im Falle einer nachträglichen Wärmedämmung sind die resultierenden U-Werte abhängig von der Wärmeleitfähigkeit des Dämmmaterials, der Dicke der Dämmschicht sowie den U-Werten im Ausgangszustand (Abbildung 9). Der U-Wert einer Außenwand im derzeitigen Neubaustandard[7] liegt bei 0,28 W/(m²*K), während hocheffiziente Passivhäuser U-Werte von 0,1 bis 0,15 W/(m²*K) voraussetzen (Feist 2006).

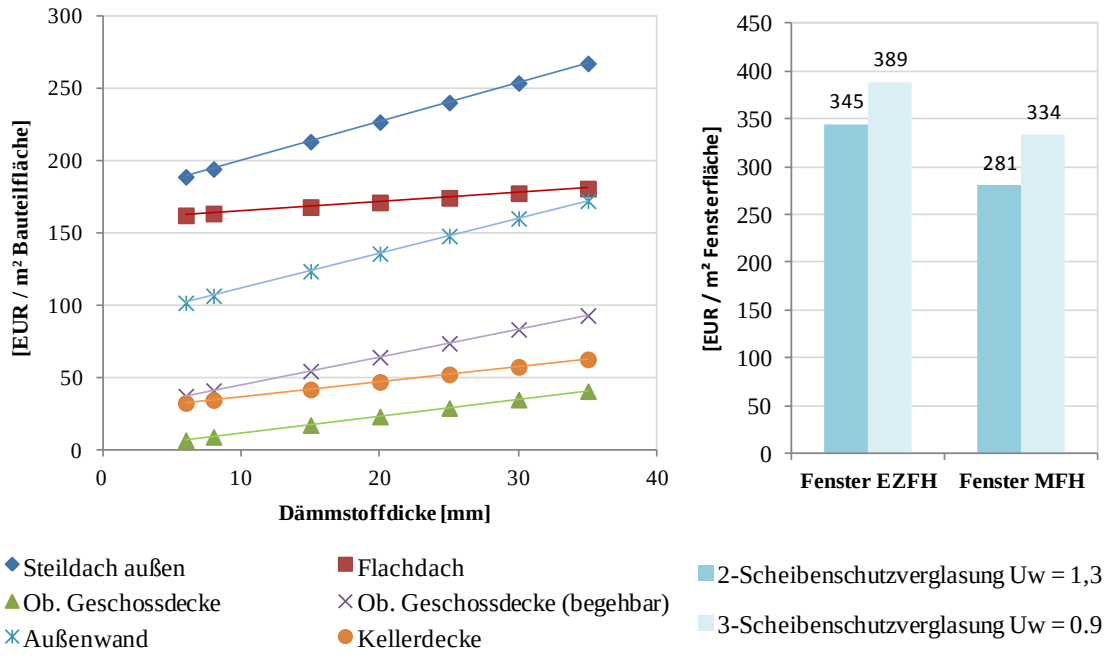
[7] U-Wert der Außenwand im Referenzgebäude der Energieeinsparverordnung (EnEV 2013).



Wärmeleitwert des Dämmmaterials von 0.035 W/(m*K). Siehe Formel (53)

Abbildung 9: Wärmedurchgangskoeffizient bei nachträglicher Dämmung opaker Bauteile

Abbildung 10 differenziert mögliche Effizienzmaßnahmen an der Gebäudehülle anhand der spezifischen Investitionen pro Quadratmeter Bauteilfläche in Abhängigkeit der Dämmstoffdicke bzw. in Abhängigkeit des U-Wertes beim Austausch von Fenstern. Die aufgezeigten Werte stellen die spezifischen Investitionen im Sinne einer Vollkostenrechnung bei der energetischen Sanierung inklusive Material- und Arbeitsaufwand dar. Die Daten basieren auf der Auswertung real umgesetzter Projekte, wobei unterschiedliche Dämmstoffe auf eine äquivalente Dämmstoffdicke mit einem Wärmeleitwert von 0,035 W/(m*K) umgerechnet worden sind (Hinz 2011). Für eine Darstellung spezifischer Materialkosten verschiedener Dämmstoffe sei auf Wietschel et al. (2010) verwiesen.

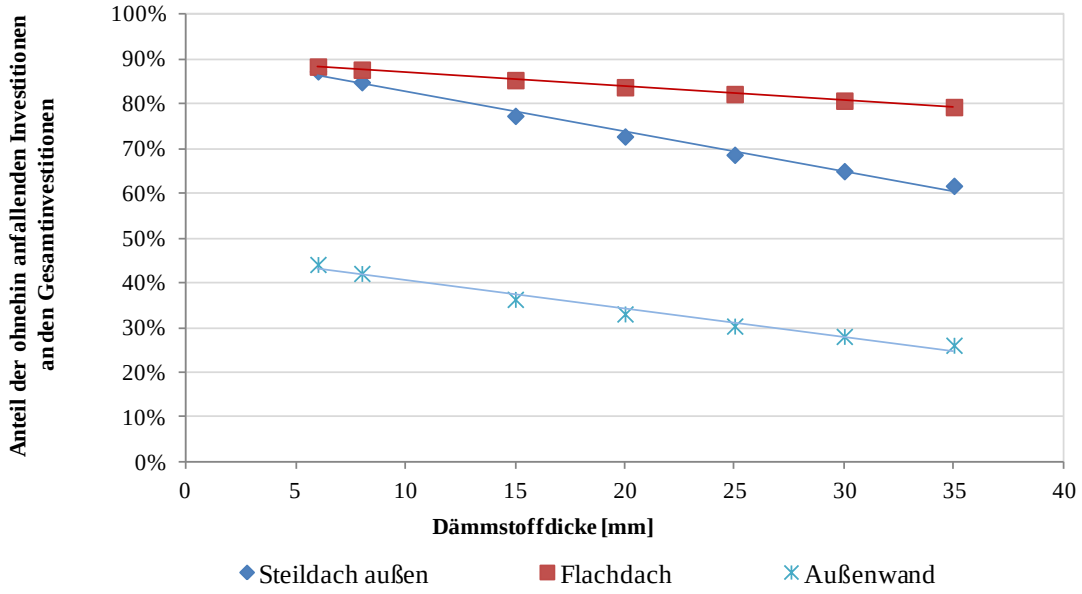


Quelle: Eigene Darstellung; (Hinz 2011)

Abbildung 10: Spezifische Investitionen von Effizienzmaßnahmen an der Gebäudehülle

Die Wirtschaftlichkeit der energetischen Sanierung hängt maßgeblich davon ab, ob die Investition gleichzeitig mit einer ohnehin anfallenden Bauteilerneuerung durchgeführt wird (Diefenbach et al. 2010). Unter Annahme dieser Kopplung werden in der Wirtschaftlichkeitsbewertung energetischer Gebäudesanierungsmaßnahmen nur die zusätzlichen Investitionen der Effizienzmaßnahme angesetzt (vgl. 4.2.3). Abbildung 11 zeigt den Anteil der ohnehin anfallenden spezifischen Investitionen an den spezifischen Gesamtinvestitionen der energetischen Sanierung für die einzelnen Bauteile[8]. Für eine detaillierte Aufschlüsselung der unter die ohnehin anfallenden Investitionen fallenden Maßnahmen sei auf Hinz (2011) verwiesen.

[8] Die nachträgliche Dämmung der obersten Geschossdecke, der Kellerdecke sowie der Austausch der Fenster stellen für sich genommen energetische Sanierungsmaßnahmen dar, für die es keine Kopplung an zurechenbaren ohnehin anfallenden Erneuerungsmaßnahmen gibt (vgl. Hinz 2011).



Quelle: Eigene Darstellung; (Hinz 2011)

Abbildung 11: Anteil der ohnehin anfallenden Investitionen an den gesamten spezifischen Investitionen der energetischen Sanierung von Außenwänden und Dach

2.3 Strukturierung der Akteure und der Investitionsprozesse im Gebäudebereich

2.3.1 Relevante Akteure und deren Beziehungen

Anhand der Wertschöpfungskette der mit der Wärmenachfrage und -erzeugung verbundenen Dienstleistungen und Produkte lassen sich die relevanten Akteure für die Investitionsprozesse im Gebäudebereich identifizieren. Abbildung 12 stellt die entsprechenden Akteursgruppen und deren Beziehung dar[9]:

- Gebäudeeigentümer stellen als Entscheider über Investitionen zur Reduktion der Wärmenachfrage und zur Art der Versorgung die zentralen Akteure dar. Die Wärmenachfrage wiederum wird durch die Nutzer der Gebäude bestimmt. Aufgrund der hohen Mietquote im Bereich der Wohngebäude in Deutschland[10] sind Entscheider und Nutzer in vielen Fällen unterschiedliche Akteure, was durch

[9] Eine ähnliche Gliederung findet sich in Schulz et al. (2011).

[10] 52 Prozent aller Wohnungen in Deutschland sind vermietet (StaBuA 2013e).

das sogenannte *Nutzer-Investor-Dilemma* beschrieben wird (Bürger, Reitze, et al. 2012; Markewitz and Stein 2003; Nast et al. 2006).

- Energieversorger- und Brennstoffhändler umfassen die Verkäufer von Energieträgern und Energiedienstleistungen. Sie verfügen über eine meist langfristige Beziehung zu Gebäudeeigentümern oder Wärmenachfragern in Form von Lieferverträgen.
- Technologiehersteller umfassen die Anbieter von Wärmeversorgungssystemen und Energieeffizienzprodukten wie Dämmstoffen und energieeffizienten Fenstern. Die Beziehung zu den Investoren beschränkt sich in der Regel auf eine informatorische Rolle bzw. auf das Marketing der im Produktportfolio befindlichen Technologien.
- Vertrieb, Planung und Installation der Produkte werden hingegen durch Heizungsinstallateure, Bauunternehmen und Architekten durchgeführt, denen als Intermediäre eine zentrale Rolle bei der Diffusion von erneuerbaren Wärmeversorgungssystemen und Energieeffizienzmaßnahmen zukommt. Energieberater und Verbraucherzentralen sowie Banken und Finanzinstitute sind weitere wichtige Intermediäre im Bereich der Information bzw. der Finanzierung von Maßnahmen.
- Der Gesetzgeber und die relevanten Institutionen auf kommunaler, Landes- und Bundesebene setzen ordnungsrechtliche Rahmenbedingungen für Technologiehersteller, Versorger und Gebäudeeigentümer und finanzieren Maßnahmen durch Vergabe direkter Zuschüsse an Investoren oder über zinsvergünstigte Darlehen, die über die Privatbanken abgewickelt werden (vgl. 3.3).

Neben der Einflussnahme der Intermediären, Anbietern und den politischen Akteuren ist die Investitionsentscheidung maßgeblich abhängig von den individuellen Entscheidungskalkülen der Investoren sowie spezifischen Hemmnissen denen sie ausgesetzt sind. Im Folgenden wird daher auf Grundlage vorhandener Literatur eine genauere Differenzierung der Investoren als zentrale Akteursgruppe im Gebäudebereich durchgeführt.

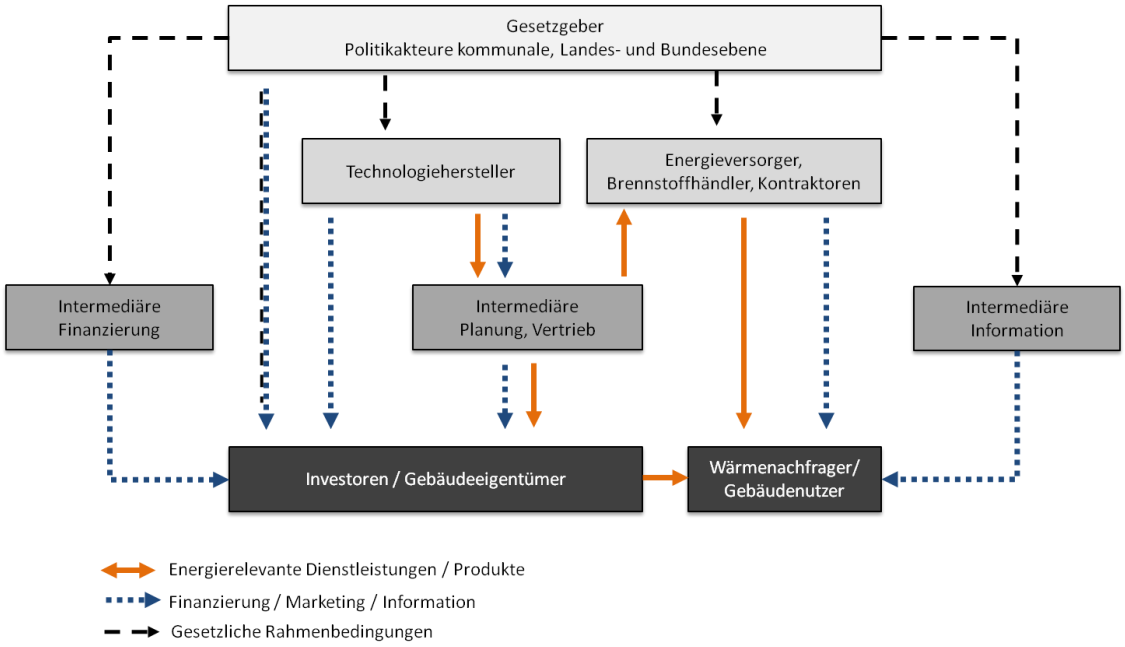


Abbildung 12: Darstellung der Akteursbeziehungen im Gebäudebereich

2.3.2 Gliederung der Investoren im Gebäudebereich

Soziodemographische Differenzierung

Eine Möglichkeit zur Differenzierung der Investoren stellt eine Unterscheidung anhand soziodemographischer Eigenschaften wie Alter, Bildungsniveau und Einkommen dar. Entsprechende Daten für die Haushalte liefert die Mikrozensus-Erhebung des Statistischen Bundesamtes (StaBuA 2013b). Eine entsprechende Differenzierung ist allerdings nur bedingt geeignet, um die Investoren im Gebäudebereich zu unterscheiden. Soziodemographische Merkmale lassen eine Unterscheidung privater Eigentümer zu, zur Beschreibung institutioneller Investoren sind diese jedoch nicht geeignet. Für den Bereich der privaten Eigentümer lassen soziodemographische Parameter zwar Rückschlüsse auf die Relevanz bestimmter Hemmnisse zu, beispielsweise auf fehlende finanzielle Ressourcen anhand des Einkommens, jedoch sind Einflüsse auf Entscheidungsverhalten und Informationsdefizite nicht oder nur in geringem Maße möglich (vgl. Braun 2010).

Einteilung in Nachfragerkategorien

Eine viel zitierte und oft angewendete Gliederung von Konsumenten im Rahmen von Untersuchungen zu technologischen Diffusionsprozessen stellt die Kategorisierung von Rogers (2003) dar. Darin werden Individuen anhand ihrer Innovationsorientierung in

fünf Kategorien eingeteilt, deren Adaptionsverhalten vom Marktanteil bzw. von der Marktreife der Technologien abhängt. Die Anwendung dieser Klassifizierung eignet sich insbesondere für Untersuchungen, in denen der Diffusionsprozess einer innovativen Technologie in einem Nischensegment gegenüber einem Marktregime etablierter Technologien erklärt werden soll. Die Innovationsorientierung der Investoren ist im Sinne unterschiedlicher Risikoaversion bzw. Skepsis gegenüber neuer Technologien ebenfalls relevant bei der Investitionsentscheidung von Energieeffizienzmaßnahmen und Wärmeversorgungssystemen. Allerdings vernachlässigt diese Klassifizierung andere Aspekte, die sich beispielsweise aus unterschiedlicher Nachhaltigkeitsorientierung ergeben.

Sinus-Milieus-Klassifizierung

Diese wird hingegen in der Klassifizierung der *Sinus-Milieus* berücksichtigt (Borgstedt et al. 2010; Sinus Institut 2014). Diese gliedert die Bevölkerung anhand soziokultureller Muster von Lebensstilen, die neben den verfügbaren Ressourcen wie Bildung und Einkommen durch die geographische Lage und durch die Werteeinstellungen beeinflusst werden. Es wird zwischen zehn Milieus unterschieden, die allerdings nicht trennscharf sind, sondern ineinander übergehen. Eine Beschreibung der *Sinus-Milieus* und deren Charakterisierung eines umweltbewussten Verhaltens findet sich in Borgstedt et al. (2010).

Einteilung hinsichtlich der Eigentums-Nutzungsverhältnisse

Vor dem Hintergrund des *Nutzer-Investor-Dilemmas* erfordert die Gliederung der Investoren im Gebäudebereich jedoch auch eine Unterscheidung bezüglich der Eigentums-Nutzungsverhältnisse. Des Weiteren beziehen sich die dargestellten Klassifizierungen anhand von Lebensstilen, sozioökonomischen Parametern oder Innovationsorientierung auf Zielgruppen von Individuen. Die Akteure im Gebäudebereich setzten sich jedoch sowohl aus privaten als auch institutionellen Investoren zusammen. Eine entsprechenden Gliederung der Investoren für den Wohngebäudebereich unterscheidet zwischen (Diefenbach et al. 2010; Schultz et al. 2011):

- Eigentümer Eigennutzer
- privaten Vermietern
- Eigentümergemeinschaften
- Wohnungsgesellschaften

Eine ähnliche Gliederung nach selbstnutzenden Eigentümern, privaten und institutionellen Vermietern wird von Stengel (2014) vorgenommen. Für den Nichtwohngebäudebereich schlagen Schulz et al. (2011) eine Gliederung nach Wirtschaftsektoren sowie teilweise nach den Betriebs- und Eigentumsverhältnissen vor. Die Datenlage zur Gebäudestruktur und insbesondere den Eigentumsverhältnissen im Nichtwohngebäudebereich ist im Vergleich zum Wohngebäudebereich jedoch äußert dürftig (vgl. 5.6.1). Für den Wohngebäudebereich existieren jedoch empirische Untersuchungen, die eine detailliertere Beschreibung und weitere Differenzierung der Investoren hinsichtlich der Entscheidungskalküle und der bestehenden Hemmnisse erlauben.

2.3.3 Investorenspezifische Hemmnisse und Entscheidungskalküle

Eigentümer Eigennutzer und Eigentümergemeinschaften

Gemessen an der Anzahl der im Besitz befindlichen Gebäude stellen die Eigentümer von Ein- und Zweifamilienhäusern die größte Akteursgruppe dar (Diefenbach et al. 2010). Neben finanziellen Hemmnissen, durch mangelndes Eigenkapital und Abneigung gegenüber Kreditfinanzierungen, sind informatorische und administrative Hemmnisse aufgrund des niedrigen Professionalisierungsgrades der Investoren relevant (Bürger, Reitze, et al. 2012). Fördernde Faktoren zeigen sich durch Nachhaltigkeitsorientierung und in der Fokussierung auf Energieeinsparungen. Diese führen dazu, dass auch Effizienzinvestitionen durchgeführt werden, die nach ökonomischen Maßen unwirtschaftlich sind. In Abhängigkeit der Relevanz der einzelnen Hemmnisse und fördernder Faktoren ist die Gruppe der Eigentümer Eigennutzer somit sehr heterogen zu bewerten. In Eigentümergemeinschaften stellt die Heterogenität der Besitzer einen hemmenden Faktor dar, da aufgrund der nach Wohneigentumsgesetz geregelten Zustimmungsklauseln Energieeffizienzmaßnahmen, die über eine reine Instandsetzung hinausgehen, mit Dreiviertelmehrheit oder in bestimmten Fällen sogar mit einheitlicher Zustimmung beschlossen werden müssen (WoEigG 2014 § 22 (2)).

Vor dem Hintergrund der Heterogenität der Eigentümer Eigennutzer führen Stieß et al. (2010) eine weitere Differenzierung dieser Investoren anhand ihrer Handlungsmotive, Einstellungen und den spezifischen Hemmnissen bei der Adaption von Energieeffizienzinvestitionen durch. Tabelle 1 zeigt die Eigenschaften der auf Grundlage einer standardisierten Befragung gewonnenen Zielgruppen und deren Anteile an der Gruppe der Eigentümer Eigennutzer.

Tabelle 1: Differenzierung der Investoren in der Gruppe der Eigentümer Eigennutzer

Zielgruppen Typ	**Anteil**	**Nachhaltigkeits-orientierung**	**Sanierungs-volumen**	**Kredit Finanzie-rung**	**Informations-quellen**
Überzeugter Energiesparer	25 %	Hoch	Hoch	Ja	Energieberatung Handwerker Soz. Netzwerk Fachzeitschriften Internet
Aufgeschlosse-ner Skeptiker	29 %	Mittel	Mittel	Nein	Energieberatung Handwerker Soz. Netzwerk Fachzeitschriften Internet
Unreflektierter Instandhalter	12 %	Wenig	Mittel	Ja	Handwerker Soz. Netzwerk
Desinteressier-ter Unwilliger	14 %	Keine	Niedrig	Nein	Handwerker Baumarkt Soz. Netzwerk
Engagierter Wohnwert-optimierer	20 %	Keine	Niedrig	-	Handwerker Baumarkt

Quelle: Eigene Darstellung; (Stieß et al. 2010)

Mit Bezug auf die relevanten Entscheidungskalküle ermitteln Schulz et al. (2011) in einer Expertenbefragung, dass die Investitionen einer Maßnahme bei den Eigentümern Eigennutzer das zentrale Kriterium bildet, gefolgt von Energiekosteneinsparungen. In einer repräsentativen Befragung von Mindline Energy (2009) werden von Eigentümern am häufigsten die Heizkosteneinsparungen, Umweltfreundlichkeit des Heizsystems und die Anschaffungskosten als Entscheidungskriterien genannt. Eine differenzierte Betrachtung lassen die durch Stieß et al. (2010) ermittelten zentralen Handlungsmotive zu. Tabelle 2 stellt die Häufigkeit der als zutreffend genannten Motive der einzelnen Zielgruppen dar.

Tabelle 2: Handlungsmotive der Investoren in der Gruppe Eigentümer Eigennutzer

Motive – Anteil mit Nennung „trifft zu“ und „trifft eher zu“	*EnerSp*	*Skept*	*Instand*	*DesUn*	*EnWoh*
langfristig Energiekosten senken	98%	77%	73%		
Heizenergie einsparen	98%	78%	75%		
Lauf. Kosten senken/beschränken	95%	75%	62%		
Beitrag zum Klimaschutz leisten	82%				
Größere Unabhängigkeit von Öl/Gas	69%				
Werterhalt des Hauses sichern	85%	92%		70%	49%
Werterhalt des Hauses steigern	83%	90%		63%	60%
Behaglicheres Wohnklima schaffen	81%	86%	53%		35%
Technisch auf den neuesten Stand bringen	81%	87%	57%		
Haus verschönern		77%		83%	79%
Notwendige Instandhaltungen durchführen	58%	86%	78%	75%	38%
Defektes Bauteil ersetzen			82%	40%	
Schnell auf anstehenden Defekt reagieren			71%	45%	
bauliche Mängel beseitigen				42%	
Mehr Platz und Fläche im Hausschaffen					38%
Vorsorge für das Wohnen im Alter treffen		63%			

EnerSp: Überzeugter Energiesparer; *Skep*: Aufgeschlossener Skeptiker;
Instand: Unreflektierter Instandhalter; *DesUn*: Desinteressierter Unwilliger;
EnWoh: Engagierter Wohnoptimierer

Quelle: Eigene Darstellung; (Stieß et al. 2010)

Private Vermieter und Wohnungsgesellschaften

Ein zentrales Hemmnis im vermieteten Wohnungsbereich stellt das *Nutzer-Investor-Dilemma* dar. Von den mit einer Energieeffizienzmaßnahme verbundenen Energieeinsparungen profitieren nicht die Investoren, so dass der ökonomische Anreiz nur in der realisierbaren Miete nach der Sanierung und der möglichen Wertsteigerung des Gebäudes liegt. Die Umlagemöglichkeit der Investitionen auf die Miete ist dabei der entscheidende Faktor, der einerseits rechtlich festgelegt ist, anderseits auch über die mietmarktspezifischen Gegebenheiten bestimmt wird. Da ökologische und effizienztechnische Kriterien in der Regel nicht in den Mietspiegeln und damit in der ortsüblichen Vergleichsmiete berücksichtigt sind (Klinski et al. 2013), ist in Abhängigkeit der Mietmarktsituation – Mieter- oder Vermietermarkt – die Ausnutzung der rechtlich vorgegebenen Umlagemöglichkeit mitunter nicht möglich. Zudem spielt bei der Woh-

nungswahl das Kriterium Energieeffizienz für die Mieter im Vergleich zu anderen Ausstattungsmerkmalen oftmals eine untergeordnete Rolle (Kremer 2005). Die Höhe der realisierten Umlage ist jedoch auch abhängig vom Professionalisierungsgrad der Vermieter (Schätzl et al. 2007). Der Unterschied in der Professionalisierung zeigt sich insbesondere zwischen Wohnungsgesellschaften und privaten Vermietern, jedoch auch innerhalb der Gruppe der privaten Vermieter, was ebenso in unterschiedlichen informatorischen Defiziten resultiert. Des Weiteren ist ein begrenztes Finanzbudget und fehlendes Eigenkapital eher ein relevantes Hemmnis für private Vermieter als für institutionelle Vermieter wie Wohnungsgesellschaften.

3 Politikmaßnahmen zur Förderung erneuerbarer Energien und Energieeffizienz in Gebäuden

3.1 Einführung

Die Reduktion des Energiebedarfs und der Ausbau erneuerbarer Energien (EE) in der Energieversorgung stellen wichtige politische Ziele in Deutschland und der Europäischen Union dar, die durch Nachhaltigkeitsaspekte, Versorgungssicherheit und wirtschaftliche Wettbewerbsfähigkeit getrieben werden. In diesem Zusammenhang werden unterschiedliche Politikinstrumente zur Förderung von Energieeffizienz und EE diskutiert und angewendet. Dieses Kapitel gibt einen Überblick über den derzeitigen Rechts- und Förderrahmen in Deutschland und der Europäischen Union und diskutiert mögliche Optionen zur Weiterentwicklung.

3.2 Kategorisierung von Politikinstrumenten

Anstelle einer einheitlichen und allgemein anerkannten Klassifikation von Politikinstrumenten existieren in der politikwissenschaftlichen Literatur unterschiedliche Taxonomien, die in Abhängigkeit des jeweiligen Politikfeldes und der Forschungsfragen angewendet werden (Bemelmans-Videc et al. 1998). Vedung (1998) teilt Politikinstrumente in Verordnungen bzw. Ordnungsrecht („regulations“), finanzielle Fördermaßnahmen („economic means“) und informatorische Instrumente („information“) ein. Anderson (1977) wiederum kategorisiert Politikinstrumente anhand des Interventionsgrades durch den Staat, angefangen von marktbasierten Mechanismen bis zum Ordnungsrecht. Hinsichtlich der Förderung von EE im Wärmebereich unterscheiden Bürger et al. (2008) zwischen fiskalischen Instrumenten, Abnahme-, Absatz- und Vergütungsverpflichtungen sowie Nutzungspflichten und anderen Verordnungen. Aus dieser Einteilung lässt sich auch eine Unterscheidung anhand der finanziellen Belastung des Staatshaushaltes in haushaltsabhängige und haushaltsunabhängige Politikinstrumente ableiten. Bei haushaltsunabhängigen Fördermaßnahmen werden bestimmte Akteure mit verbindlichen Verpflichtungen oder Anreizen belegt, ohne dass eine Refinanzierung durch öffentliche Gelder nötig ist.

Die Gliederung der im Folgenden dargestellten Politikinstrumente erfolgt aus Sicht der Investoren von Energieeffizienzmaßnahmen und Wärmeversorgungstechnologien. Ordnungsrechtliche Förderinstrumente führen zu einer zusätzlichen Belastung für diese Akteure, während finanzielle Förderinstrumente eine Entlastung darstellen.

3.3 Derzeitiger Rechts- und Förderrahmen in Deutschland und Europa

3.3.1 Europapolitische Vorgaben und Ziele

Die Mitgliedstaaten der Europäischen Union (EU) haben sich mit der Verabschiedung des *Energie- und Klimapakets* und den damit verbundenen „20-20-20-Zielen“[11] im Jahr 2008 erstmalig auf verbindliche Ziele zum Klimaschutz, zum Ausbau der erneuerbaren Energien und zum Rückgang des Energiebedarfs geeinigt (Council of the European Union 2008). Infolge dieses Prozesses wurden entsprechende Richtlinien verabschiedet mit Relevanz für die zukünftige Wärmeversorgung und die Entwicklung der Energieeffizienz in Gebäuden in den Mitgliedstaaten.

Richtline zur Förderung der Nutzung von Energien aus erneuerbaren Quellen

Die im Jahr 2009 erlassene *Erneuerbaren-Energien-Richtlinie*[12] (RL 2009/28/EG 2009) setzt nicht nur Rahmenbedingung für EE im Strombereich, sondern auch weitreichende Anforderungen an die Förderung erneuerbarer Wärme. In Artikel 13 (4) und (5) heißt es dazu:

(4) „Bis spätestens zum 31. Dezember 2014 schreiben die Mitgliedstaaten in ihren Bauvorschriften und Regelwerken oder auf andere Weise mit vergleichbarem Ergebnis, sofern angemessen, vor, dass in neuen Gebäuden und in bestehenden Gebäuden, an denen größere Renovierungsarbeiten vorgenommen werden, ein Mindestmaß an Energie aus erneuerbaren Quellen genutzt wird.“ [..] (5) „Die Mitgliedstaaten stellen sicher, dass neu errichtete öffentliche Gebäude sowie bestehende öffentliche Gebäude, an denen größere Renovierungsmaßnahmen vorgenommen werden, auf nationaler, regionaler und lokaler Ebene ab dem 1. Januar 2012 eine Vorbildfunktion im Rahmen dieser Richtlinie erfüllen.“ (RL 2009/28/EG, § 13(4,5))

Durch die Richtlinie werden die Mitgliedstaaten somit verpflichtet, eine Nutzungspflicht für erneuerbare Energien in Neubauten und bestehenden Gebäuden – im Falle einer grundlegenden Sanierung – einzuführen. Der Paragraph lässt jedoch unterschiedliche

---

[11] Die Zielsetzung sieht vor, bis zum Jahr 2020 in der EU die Treibhausgasemissionen um 20 Prozent gegenüber 1990 zu mindern, die Energieeffizienz um 20 Prozent zu steigern und den Anteil EE an der Energiebereitstellung auf 20 Prozent zu erhöhen.

[12] Richtlinie 2009/28/EG vom 23. April 2009 des Europäischen Parlaments und des Rates zur Förderung der Nutzung von Energie aus erneuerbaren Quellen und zur Änderung und anschließenden Aufhebung der Richtlinien 2001/77/EG und 2003/30/EG

Interpretationsmöglichkeiten zu, inwiefern andere Politikinstrumente auch zulässig wären, wenn diese eine vergleichbare Wirkung erzielen (Steinbach, Ragwitz, et al. 2013).

Richtlinie über die Gesamtenergieeffizienz von Gebäuden

Die Neufassung der Gebäude-Richtlinie[13] (RL 2010/31/EU 2010) definiert eine Reihe von Anforderungen an die Energieeffizienz von neuen und bestehenden Gebäuden. Dabei führt die Richtlinie den Begriff des „kostenoptimalen Niveaus von Mindestanforderungen an die Gesamtenergieeffizienz von Gebäuden und Gebäudekomponenten" ein (RL 2010/31/EU: § 5(2)). Diese sollen von den Mitgliedstaaten als Berechnungsgrundlage für die Ausgestaltung der entsprechenden ordnungsrechtlichen Politikinstrumente angewendet werden. Durch die Richtline wird somit das Anforderungsniveau an die Energieeffizienz insofern beschränkt, als dieses *kostenoptimal* sein muss. Damit werden ambitioniertere Mindestanforderungen, welche nicht wirtschaftlich sind, ohne begleitende finanzielle Förderung ausgeschlossen. Des Weiteren fordert die Richtlinie, dass neue Gebäude ab dem Jahr 2021[14] nur noch als „Niedrigstenergiegebäude" erbaut werden sowie generell die Anzahl an Niedrigstenergiegebäuden zu erhöhen (RL 2010/31/EU, § 9 (1)). Der Begriff *Niedrigstenergiegebäude* ist im Sinne der Richtlinie über den Energiebedarf und die Versorgung mit erneuerbaren Energien definiert:

„Der fast bei Null liegende oder sehr geringe Energiebedarf sollte zu einem ganz wesentlichen Teil durch Energie aus erneuerbaren Quellen –einschließlich Energie aus erneuerbaren Quellen, die am Standort oder in der Nähe erzeugt wird –gedeckt werden;" (RL 2010/31/EU: § 2 (2)).

Eine exakte Definition in Form eines maximal zulässigen Primärenergiebedarfs soll länderspezifisch durch die jeweiligen Mitgliedstaaten erfolgen (RL 2010/31/EU: § 9 (3)).

Richtlinie zur Energieeffizienz

Mit der *Energieeffizienz-Richtlinie (2012/27/EU)*[15] soll sichergestellt werden, dass das übergeordnete EU-Ziel einer zwanzigprozentigen Primärenergiebedarfsreduktion bis 2020 erreicht wird. Die Richtlinie adressiert die Energieeffizienz sektorübergreifend von

---

13 Richtline 2010/31/EU vom 19. Mai 2010 des Europäischen Parlaments und des Rates über die Gesamtenergieeffizienz von Gebäuden (Neufassung)

14 Für neue Gebäude im Besitz der öffentlichen Hand gilt die Anforderung bereits ab dem Jahr 2019.

15 Richtlinie 2012/27/EU des Europäischen Parlaments und des Rates vom 25. Oktober 2012 zur Energieeffizienz, zur Änderung der Richtlinien 2009/125/EG und 2010/30/EU und zur Aufhebung der Richtlinien 2004/8/EG und 2006/32/EG

der Erzeugung über Transport und Umwandlung bis zur Nachfrageseite. Mitgliedstaaten werden verpflichtet ein nationales Energieeffizienzziel für den Zeithorizont 2020 festzulegen, welches *„sich entweder auf den Primärenergie- oder den Endenergieverbrauch oder auf die Primärenergie- oder Endenergieeinsparungen oder auf die Energieintensität bezieht“* (RL 2012/27/EU 2012: §3(1)).[16] Um die Zielerreichung zu gewährleisten, benennt die Richtlinie eine Reihe von Maßnahmen und Rahmenbedingen zur Ausgestaltung entsprechender Politikinstrumente. Die für den Gebäudebereich relevantesten Anforderungen sind dabei der „Vorbildcharakter der Gebäude öffentlicher Einrichtungen“ (§ 5) und die Einführung von Energieeffizienzverpflichtungssystemen (§7). Ersteres schreibt eine energetische Sanierungsrate für Gebäude im Eigentum der Zentralregierung (Bundesgebäude) von 3 Prozent ab dem Jahr 2014 vor. Weitreichender ist jedoch die Forderung, dass von 2014 bis 2020 jährlich 1,5 Prozent des gesamten Energieabsatzes eingespart werden soll. Dabei wird den Mitgliedstaaten freigestellt, ob dies über die Einführung eines Energieeffizienzverpflichtungssystems für Energieversorgungsunternehmen erreicht wird (vgl. 3.4.3) oder alternative ordnungsrechtliche, finanzielle oder fiskalische Maßnahmen zur Anwendung kommen.

3.3.2 Ziele der Bundesregierung

Das Energiekonzept der Bundesregierung aus dem Jahr 2010 und dessen Erweiterung im Zuge der Energiewende definieren verbindliche Ziele für die Entwicklung des Energiebedarfs, der Treibhausgasemissionen sowie den Ausbau erneuerbarer Energien in Deutschland (BMU and BMWI 2011). Das definierte Zielsystem umfasst unterschiedliche Ebenen, einerseits hinsichtlich der zeitlichen Dimension, anderseits bezüglich der Spezifikation mit Bezug auf die unterschiedlichen Energienachfrage- und Angebotssektoren (Abbildung 13).

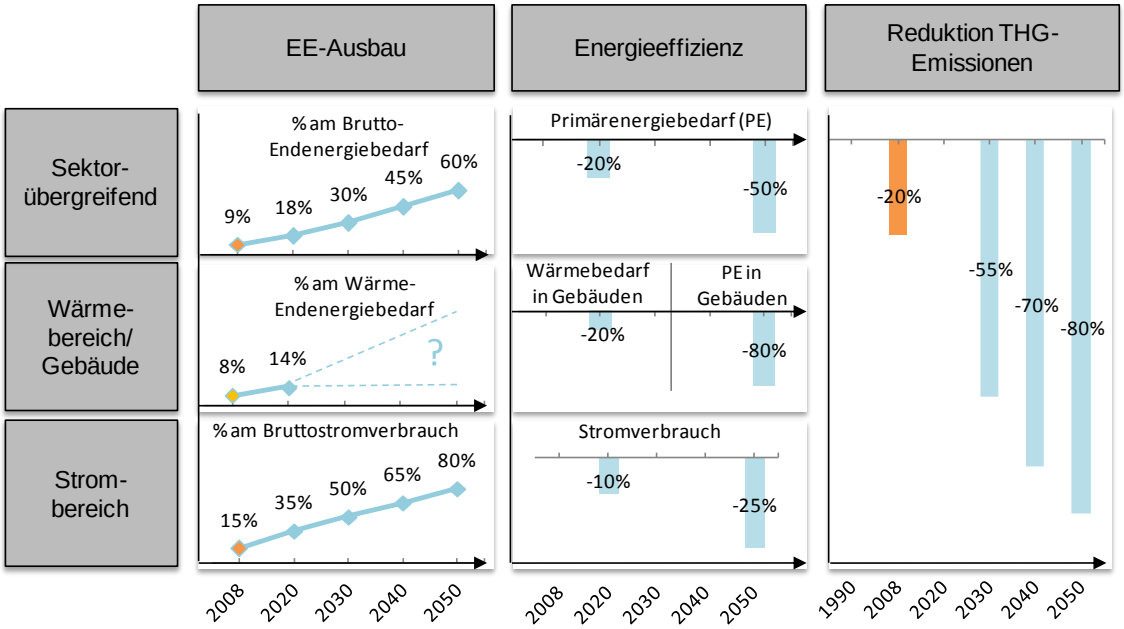
Für den Untersuchungsrahmen in dieser Arbeit sind insbesondere die Ziele für den Gebäude- und Wärmebereich bis zum Jahr 2020 von Relevanz. Das Energiekonzept und die Energiewendebeschlüsse definieren folgende sektorspezifischen Ziele für diesen Bereich:

- Zwanzigprozentige Reduktion des Wärmeenergiebedarfs in Gebäuden bis zum Jahr 2020 gegenüber 2008
- Steigerung der energetischen Sanierungsrate auf 2 Prozent pro Jahr

[16] Das Ziel ist allerdings nicht bindend, so dass bei Nichteinhaltung durch einen Mitgliedstaat keine Strafmaßnahmen durch die EU verhängt werden können.

- Als langfristiges Ziel wird die Reduktion des Primärenergiebedarfs um 80 Prozent im Gebäudebereich bis zum Jahr 2050 definiert[17]

Darüber hinaus wird durch das *Erneuerbare-Energien-Wärmegesetz* (*EEWärmeG*) das Ziel definiert, den Anteil erneuerbarer Energien am Wärme- und Kälteendenergiebedarf auf 14 Prozent bis zum Jahr 2020 zu erhöhen.



Quelle: Eigene Darstellung auf Basis von (AGEE-Stat 2012; BMU and BMWI 2011; UBA 2011)

Abbildung 13: Darstellung des Zielsystems des Energiekonzeptes und der Zielgrößen[18]

Mit dem Energiekonzept und den weiteren Beschlüssen aus der Energiewende sind somit verbindliche Klimaschutzziele definiert, an denen sich die Ausgestaltung des Rechts- und Förderrahmens orientieren muss. Die Definition konkreter Zielgrößen auf Ebene einzelner Energiesystemsektoren erlaubt zudem eine Zielerreichungskontrolle und Bewertung von Politikinstrumenten bzw. Maßnahmenbündeln, welche auf die Steigerung der Energieeffizienz und des Ausbaus erneuerbarer Wärme abzielen.

---

17 Die Zielsetzung ist jedoch in einem wichtigen Punkt nicht eindeutig: Es ist umstritten, ob sich die Reduktion auf den gesamten Primärenergiebedarf nach der Energiebilanz bezieht oder nur auf den „nicht-erneuerbaren“ Teil, wie er auf Ebene der Gebäude (vgl. 2.2.3) durch die *EnEV* definiert wird (Löschel et al. 2014). In der zweiten Interpretation wäre die Erfüllung des Primärenergiebedarfszieles theoretisch auch nur durch den Ausbau von EE-Wärme ohne Effizienzmaßnahmen möglich.

18 Darstellung ohne die Ziele im Verkehrssektor

3.3.3 Politikinstrumente zur Förderung von Energieeffizienz und erneuerbaren Energien in Deutschland

Die Hauptinstrumente zur Förderung von Energieeffizienz und erneuerbarer Wärme auf nationaler Ebene bestehen in ordnungsrechtlichen Vorgaben und finanziellen Fördermechanismen (Abbildung 14).

	Finanzielle Förderung	**Ordnungsrecht \ Steuer**
EE Wärme	Marktanreizprogramm Investitionszuschüsse, vergünstigte Kredite für EE-Wärmeerzeuger	EEWärmeG Nutzungspflicht für EE im Neubau, öffentliche Bestandsgebäude, Wohngebäudebestand in BaWü
Energie-effizienz	KfW Energieeffizient Sanieren / Energieeffizient Bauen Vergünstige Kredite / Tilgungszuschuss für energieeffiziente Gebäude	Energieeinsparverordnung Mindestanforderungen an den Primärenergiebedarf und die Energieeffizienz von Bauteilen in Neubauten und bestehenden Gebäuden im Falle einer Sanierung
Andere Energie-sektoren	EEG/ KWGK Vergütung für KWK-Strom/ EE-Stromerzeugung mit Bonus für Wärme von KWK-Anlagen	Energiesteuergesetz Verbrauchssteuer auf fossile Brennstoffe

Abbildung 14: Hauptinstrumente zur Förderung von EE-Wärme und Energieeffizienz in Gebäuden in Deutschland

Dabei zielen das *Marktanreizprogramm* und das *EEWärmeG* auf eine Erhöhung des Anteils erneuerbarer Energien im Wärmebereich ab, während die Förderprogramme *Energieeffizient Sanieren, Energieeffizient Bauen* und die *Energieeinsparverordnung* (*EnEV*) insbesondere die Reduktion des Energiebedarfs in Gebäuden adressieren. Weitere Politikinstrumente, die nicht primär den Wärmebereich adressieren, jedoch indirekt wirken, sind das *Erneuerbare-Energien-Gesetz (EEG),* das Kraft-Wärme-Kopplungsgesetz *(KWKG)* sowie das *Energiesteuergesetz (EnergieStG)*. Die modellbasierte Analyse im Rahmen dieser Arbeit fokussiert sich auf die Hauptinstrumente, auf die im Folgenden näher eingegangen wird.

3.3.4 Ordnungsrechtliche Förderinstrumente

Energieeinsparverordnung

Die *Energieeinsparverordnung (EnEV)*[19] ist im Energieeinspargesetz verankert und trat erstmalig im Jahr 2002 in Kraft, womit die seit 1995 gültige Wärmeschutzverordnung und die Heizungsanlagenverordnung zusammengefasst und ersetzt wurden (Bürger, Reitze, et al. 2012). Seitdem ist die *EnEV* mehrmals novelliert worden; einerseits, um europarechtliche Vorgaben durch die Gebäuderichtlinie umzusetzen (vgl. 3.3.1), anderseits mit dem Ziel, die energetischen Mindestanforderungen von Gebäuden zu verschärfen. Die derzeitig gültige Verordnung aus dem Jahr 2009 (EnEV 2009) zielte auf eine dreißigprozentige Verschärfung der Anforderungen gegenüber der seit 2007 gültigen Verordnung ab. Die jüngste Novellierung aus dem Jahr 2013 sieht eine Verschärfung der energetischen Anforderung um weitere 25 Prozent ab dem Jahr 2016 vor, die allerdings nur für Neubauten gilt (EnEV 2013). Die *EnEV* definiert energetische Mindestanforderungen hinsichtlich des maximal zulässigen Primärenergiebedarfs für Raumwärme, Warmwasser, Lüftung und Kühlung sowie hinsichtlich der energetischen Qualität der Gebäudehülle. Zudem werden unter der Voraussetzung eines strikten Wirtschaftlichkeitsgebots Nachrüstverpflichtungen für bestimmte Bauteile gefordert. Mit dem Energieausweis führt die *EnEV* ein informatorisches Element für Gebäudebesitzer und Mieter ein.

Abbildung 15 fasst die relevanten Werte der Anforderungen zusammen, die auch in der quantitativen Analyse als Eingangsdaten in das Modell eingehen (vgl. 5.5.4) Der Jahresprimärenergiebedarf für einen Neubau wird über ein Referenzgebäudeverfahren ermittelt. Die energetischen Eigenschaften wie Wärmedurchgangskoeffizienten (U-Werte) der Gebäudeteile und das Referenzwärmeversorgungssystem werden dabei durch die Verordnung vorgegeben. Der zulässige Jahresprimärenergiebedarf wird auf dieser Basis für ein Referenzgebäude ermittelt, welches dem jeweiligen Neubau in Geometrie, Ausrichtung sowie Nutzfläche entspricht. Neben der Primärenergieanforderung existieren auch noch direkte Mindestanforderungen an die Qualität der Gebäudehülle bzw. den daraus resultierenden Nutzenergiebedarf, indem Höchstwerte für den spezifischen Transmissionswärmeverlust bzw. die Wärmedurchgangskoeffizienten

[19] Verordnung über energiesparenden Wärmeschutz und energiesparende Anlagentechnik bei Gebäuden (Energieeinsparverordnung – EnEV)

festgelegt werden[20]. Eine Erfüllung der *EnEV* nur durch Wechsel auf einen Energieträger mit niedrigem nicht-erneuerbaren Primärenergiefaktor ist somit nicht möglich.

	Neubau	Bestehende Gebäude
Nutzenergie / Qualität der Gebäudehülle	Transmissionswärmeverlust H_T' [W/(m²K)] Freistehendes WG klein 0,40 Freistehendes WG groß 0,50 Einseitig angebautes WG 0,45 Sonstige WG 0,65	Transmissionswärmeverlust H_T' ▪ 1, 4 x Anforderungen Neubau Oder: ▪ Höchstwerte für Wärmedurchgangskoeffizienten nach Anlage 3, Tabelle 1
Primärenergie-bedarf	Referenzgebäude Ausführung[1] Wärmedurchgangskoeffizient [W/(m²K)] Außenwand: 0,28 Unterer Gebäudeabschluss: 0,35 Oberer Gebäudeabschluss: 0,20 Fenster: 1,30 Außenwand: 0,28 Fossiler Brennwertkessel + Solaranlage	Referenzgebäude Ausführung ▪ 1,4 x Anforderungen Referenzgebäude Neubau
Nachrüstungs-verpflichtung		▪ Heizkessel mit Installation vor 1978[1] ▪ Dämmung obere Geschossdecke ▪ Dämmung Wärmeverteil- und Warmwasserleitungen
Energieausweis	▪ Verpflichtende Ausstellung ▪ Bedarfs- oder verbrauchsorientiert	▪ Vorzulegen bei Vermietung / Verkauf bei Nachfrage

[1] Ab 2015 Heizkessel mit Installationsjahr vor 1985

Quelle: Eigene Darstellungen; (EnEV 2009)

Abbildung 15: Anforderungen an neue und bestehende Gebäude durch die Energieeinsparverordnung

Im Falle von Sanierungsmaßnahmen an bestehenden Gebäuden sind durch die *EnEV* bedingte Sanierungsanforderungen festgelegt. Sofern eine grundlegende Sanierung des Gebäudes durchgeführt wird, darf der resultierende Primärenergiebedarf nicht mehr als 40 Prozent über den Anforderungen an einen entsprechenden Neubau liegen. Des Weiteren werden bauteilspezifische U-Werte definiert, die im Falle des Austausches oder der Sanierung einzelner Gebäudeteile mindestens eingehalten werden müssen. Eine unbedingte Sanierungspflicht wird durch die *EnEV* nicht vorgeschrieben, so dass die energetischen Mindestanforderungen nur im Falle einer Sanierung greifen. Es bestehen jedoch Nachrüstverpflichtungen zur nachträglichen Dämmung bestimmter Gebäudeteile und zum Austausch veralteter Heizkessel, sofern diese wirtschaftlich

[20] Für Wohngebäude (Anlage 1 Tabelle 2) ist dieser Wert auf die gesamte Umfassungsfläche bezogen. Die Anforderungen unterscheiden sich nach Bauart (freistehendes Gebäude, Reihenhaus und Größe). Für Nichtwohngebäude (Anlage 2 Tabelle 2) wird nach Art der Bauteile unterschieden (opak, transparent).

umzusetzen sind (EnEV, 2009; §10). Der Energieausweis stellt den informatorischen Bestandteil der *EnEV* dar. Dieser ist für alle Neubauten verpflichtend auszustellen. Bei bestehenden Gebäuden ist dieser im Fall von Vermietung oder Verkauf des Gebäudes auf Nachfrage vorzulegen. Da der Energieausweis sowohl bedarfs-, als auch verbrauchsorientiert ausgestellt werden kann, ist ein Vergleich der energetischen Qualität zwischen Gebäuden allerdings nur bedingt möglich[21].

Erneuerbare-Energien-Wärmegesetz

Das *EEWärmeG* schreibt für alle Neubauten mit Bauantrag ab 1. Januar 2009 eine anteilige Nutzungspflicht für EE-Wärmeerzeuger vor. Das Gesetz ist im Jahr 2008 verabschiedet und zwei Jahre später novelliert worden. Die letzte Novelle diente insbesondere der Adaption der europarechtlichen Anforderungen durch *die Erneuerbaren-Energien-Richtlinie* (vgl. 3.3.1), womit eine Ausweitung der Nutzungspflicht auf öffentliche Bestandsgebäude im Falle einer grundlegenden Sanierung eingeführt wurde. Tabelle 3 zeigt die durch das *EEWärmeG* vorgeschriebenen Mindestnutzungsanteile am Wärme- und Kälteendenergiebedarf in Neubauten. Darüber hinaus stellt das Gesetz den Bundesländern frei, eine Ausweitung der Nutzungspflicht auf den Gebäudebestand einzuführen[22]. Neben der Nutzung von erneuerbarer Wärme kann das Gesetz auch durch alternative Maßnahmen erfüllt werden; beispielsweise durch eine Übererfüllung der Effizienzanforderung der geltenden *EnEV* oder durch die Installation einer KWK-Anlage.

---

[21] Ein bedarfsorientierter Energieausweis basiert auf dem berechneten Norm-Energiebedarf, während der verbrauchsorientierte Energieausweis auf Grundlage des realen Verbrauchs ausgestellt wird.

[22] Eine Nutzungspflicht für EE im Gebäudebestand besteht bisher nur in Baden-Württemberg (EWärmeG 2007). Das entsprechende Landesgesetz ist bereits ein Jahr vor dem *EEWärmeG* verabschiedet worden und ist auf bestehende Wohngebäude beschränkt.

Tabelle 3: Mindestnutzungsanteile für EE im Neubau und alternative Maßnahmen nach EEWärmeG

EE-Energieträger	Mindestanteil an Wärme- und Kälte-energiebedarf	Zusätzliche oder alternative Anforde-rungen
Solarenergie	15 %	0.04 m² (0.03 m²) Aperturfläche pro m² Gebäudenutzfläche
Gasförmige Biomasse	30 %	Nur in KWK-Anlagen
Flüssige und feste Biomasse	50 %	Anlageneffizienz > = 86 % (< 50 kW)/ 88 % (>50 kW)
Erd- und Umweltwärme	50 %	Jahresarbeitszahl >=: ▪ 3.5 für Luftwärmepumpen ▪ 4.0 für andere Wärmepumpen
Alternative Maßnahmen		
Abwärme	50 %	
Wärme aus KWK-Anlagen	50 %	Nur hocheffiziente KWK-Anlagen
Wärme aus Fernwärme	100%	Im Wärmenetz: ▪ Min. 50 % aus Abwärme oder ▪ Min. 50 % von KWK-Anlagen ▪ Wesentlicher Anteil EE
Energieeffizienzmaßnahmen	▪ 15 % unter Primärenergieanforderung der EnEV ▪ 15 % unter den Ht'-Anforderungen der EnEV	

Quelle: (EEWärmeG 2011)

3.3.5 Finanzielle Förderinstrumente

Marktanreizprogramm

Das *Marktanreizprogramm (MAP)* stellt Investitionszuschüsse und vergünstigte Kredite für erneuerbare Wärmeerzeuger, große Wärmespeicher, Wärmenetze sowie Anlagen zur Aufbereitung von Biogas bereit (BMU 2012c). Dabei werden dezentrale Anlagen in Gebäuden überwiegend über den Programmteil des *Bundesamtes für Ausfuhrkontrolle* (*BafA)* mit Investitionszuschüssen gefördert, während für größere und wärmenetzbasierte Anlagen sowie Anlagen zur Gewinnung von Prozesswärme zinsvergünstigte Kredite und Tilgungszuschüsse, die über die *Kreditanstalt für Wiederaufbau (KfW)* abgewickelt werden zur Verfügung stehen[23]. Das Programm ist Ende 1999 aufgesetzt worden, um den Anteil erneuerbarer Energien an der Energiebereitstellung zu erhöhen. Die Förderung war anfangs nicht nur auf den Wärmebereich fokussiert, sondern es

[23] Die Förderung wird über das *Programm Erneuerbare Energien Premium* bereitgestellt, welches Teil des MAP ist.

wurden auch EE-Technologien zur Stromerzeugung gefördert (Kelm et al. 2008). Tabelle 4 zeigt eine Übersicht der durch das *MAP* geförderten Technologien und den Förderzeitraum bis zum Jahr 2013. Seit dem Jahr 2010 werden Anlagen zur Installation in Neubauten[24], die unter das *EEWärmeG* fallen, nicht mehr gefördert.

Tabelle 4: Geförderte Anlagen im Rahmen des MAP

Geförderte Anlagen	*Zeitraum im MAP*
Programmteil BafA	
Automatisch beschickte Biomasseanlagen bis 100 KW[25]	1999 – 2013
Handbeschickte Biomassekessel/Scheitholzvergaser	1999 - 2001; 2003 - 2013
Wärmepumpen	1999 - 2001; 2008 - 2013
Solarkollektoren	1999 – 2013
Photovoltaik in Schulen*	1999 – 2005
Programmteil KfW	
Biomassekessel/ Heizwerke > 100 KW	1999 – 2013
Biomasse KWK-Anlagen	1999 – 2013
Biogasanlagen*	1999 – 2007
Anlagen zur Aufbereitung von Biogas auf Erdgasqualität/ Biogasleitungen	2008 – 2013
Große Solarkollektoren > 40 m²	1999 – 2013
Tiefengeothermie	1999 – 2013
Große Wärmepumpen > 100 kW	2011 – 2013
Große Wärmespeicher	2008 – 2013
Wärmenetze mit EE-Einspeisung	2008 – 2013
Kleine Wasserkraftanlagen < 500 kW*	1999 – 2005

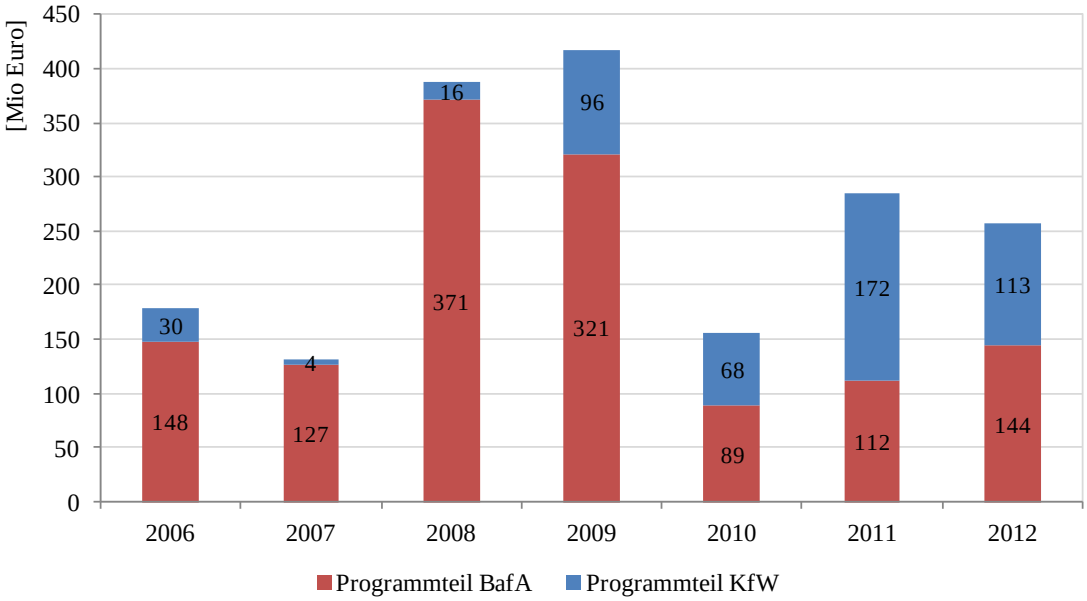
* nicht mehr durch MAP gefördert

Quelle: (BMU 2007, 2011, 2012c; Langiß et al. 2004; Langniß et al. 2006; MAP Förderrichtlinie 2002)

Den größeren Anteil des Förderbudgets wird über den Programteil *BafA* für dezentrale EE-Wärmeerzeuger zur Verfügung gestellt (Abbildung 16).

[24] Mit Bauantrag ab dem 1. Januar 2009

[25] Pellet-Kessel, Holzhackschnitzelkessel, Pellet-Öfen

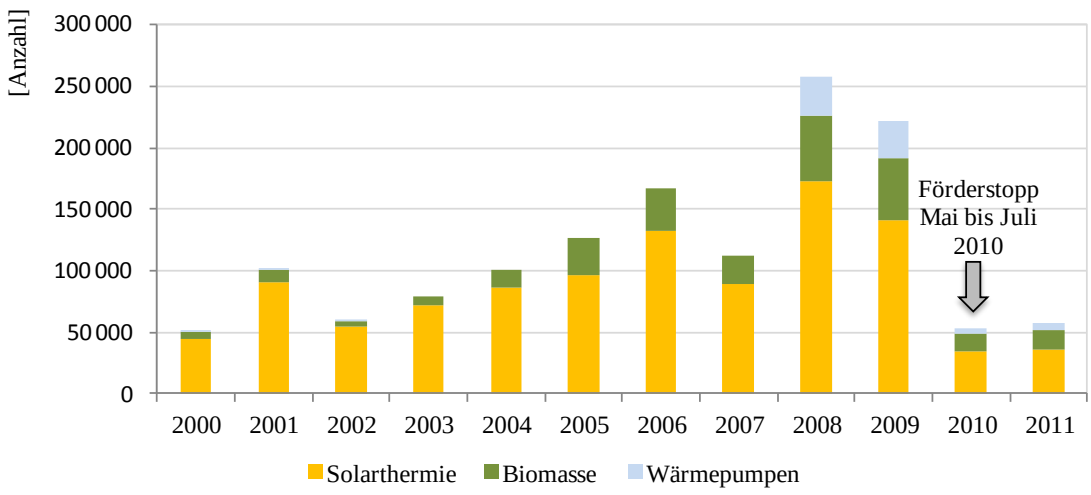


Quelle: Eigene Darstellung; (BMU 2012b, 2013a, 2013b; Böhnisch and Kelm 2007; Langniß et al. 2011)

Abbildung 16: Fördervolumen MAP 2006 bis 2012

Das *MAP* wird dabei über die Haushaltsmittel des *BMU* finanziert[29]. Seit Programmbeginn – im November 1999 – ist es hinsichtlich der Förderbedingungen und des zur Verfügung stehenden Budgets mehrfach angepasst worden und war Gegenstand kurzzeitiger Förderstopps. Abbildung 17 zeigt die Entwicklung der geförderten dezentralen Anlagen im Programmteil *BafA*. Nach einer kurzzeitigen Aussetzung des Programms um wenige Monate im Jahr 2010 aufgrund einer Haushaltssperre sind die Anträge für Investitionszuschüsse signifikant zurückgegangen, obwohl seit Wiederaufnahme entsprechende Mittel wieder zur Verfügung stehen. Der Rückgang ist dabei nur zum Teil durch den Wegfall von Fördertatbeständen wie die Förderungen von Anlagen in Neubauten zu erklären (Langniß et al. 2011).

In der quantitativen Analyse werden die jeweiligen Fördersätze der Technologien – differenziert nach Neubau und Bestandsgebäuden – sowie die real zur Verfügung stehenden Budgets für die Jahre 2008 bis 2012 im Modell hinterlegt.



Quelle: Eigene Darstellung auf Basis (BAFA 2010; BMU 2012a; Langniß et al. 2011)

Abbildung 17: Anzahl geförderter EE-Wärmeerzeuger im Programmteil der BafA

KfW-Programme Energieeffizient Sanieren und Bauen

Die *KfW*-Programme *Energieeffizient Sanieren*[26], und *Energieeffizient Bauen*[27] fördern Energieeffizienzmaßnahmen an der Gebäudehülle sowie effiziente Anlagentechnik in bestehenden und neuen Gebäuden (KfW 2013b). Bis einschließlich des Jahres 2011 haben 1,26 Millionen Wohneinheiten in bestehenden Gebäude und rund 383 Tausend Neubauwohnungen eine Förderung im Rahmen der Programme erhalten (Abbildung 18).

Im Programm *Energieeffizient Sanieren* werden sowohl umfängliche Sanierungsmaßnahmen, die zum Standard eines *KfW-Effizienzhauses* führen, als auch Einzelmaßnahmen, wie der Einbau eines effizienten Wärmeerzeugers, gefördert (Tabelle 5). Der Standard *KfW-Effizienzhaus* umfasst verschiedene Kategorien, die sich hinsichtlich der zur erreichenden energetischen Anforderungen und der gewährten finanziellen Zuschüsse unterscheiden (KfW 2013a). Maßgeblich für die Einstufung in eine Effizienzhauskategorie ist der resultierende Primärenergiebedarf (Q_p) der auf die wärmeübertragende Umfassungsfläche bezogene Transmissionswärmeverlust (H_T) des sanierten Gebäudes im Vergleich zu den Werten des Referenzgebäudes der *EnEV.* Die jeweilige *KfW-Effizienzhaus*-Kategorie *(k)* gibt das Ambitionsniveau mit Bezug auf diese Kennwerte an, die folgendermaßen ermittelt werden:

---

[26] Das Programm führt seit 2009 das *CO_2-Gebäudesanierungsprogramm* fort.

[27] Vormals Ökologisches Bauen

$$Q_{p,k} = Q_{p,EnEV-Ref} \cdot \frac{k}{100}$$
$$H_{T'k} = H_{t',EnEV-Ref} \cdot (\frac{k}{100} + 15) \qquad (1)$$

k	*Nummer der KfW-Effizienzhauskategorie (vgl. Tabelle 5)*
$Q_{p,EnEV-Ref}$	*Maximaler Primärenergiebedarf nach EnEV*
$Q_{p,k}$	*Maximaler Primärenergiebedarf KfW-Effizienzhaus k*
$H_{t',EnEV-Ref}$	*Maximaler Transmissionswärmeverlust nach EnEV*
$H_{T'k}$	*Maximaler Transmissionswärmeverlust KfW-Effizienzhaus k*

Der jeweilige *KfW-Effizienzhausstandard* gibt somit die prozentuelle Unterschreitung der Primärenergiebedarfsanforderung im Vergleich zur geltenden *EnEV* an. Gefördert werden bestehende Wohngebäude, die vor dem Baujahr 1995 errichtet wurden.

Tabelle 5: Fördertatbestände des KfW-Programms Energieeffizient Sanieren

Kategorien KfW-Effizienzhaus	KfW 55, KfW 70, KfW 85, KfW 100, KfW 115, KfW Denkmal (160) [28]
Einzelmaßnahmen	Dämmung von Gebäudehüllenkomponenten: Außenwand, Dach, Geschossdecken, Erneuerung der Fenster und Außentüren Fossile Wärmeerzeuger: Öl-/Gas-Brennwertkessel, wärmegeführte KWK-Anlagen, Wärmenetzanschluss, Gaswärmepumpen EE-Wärmeerzeuger nur in Kombination zu fossilen Systemen
Förderempfänger	Besitzer von Wohngebäuden mit Bauantrag vor dem Jahr 1995

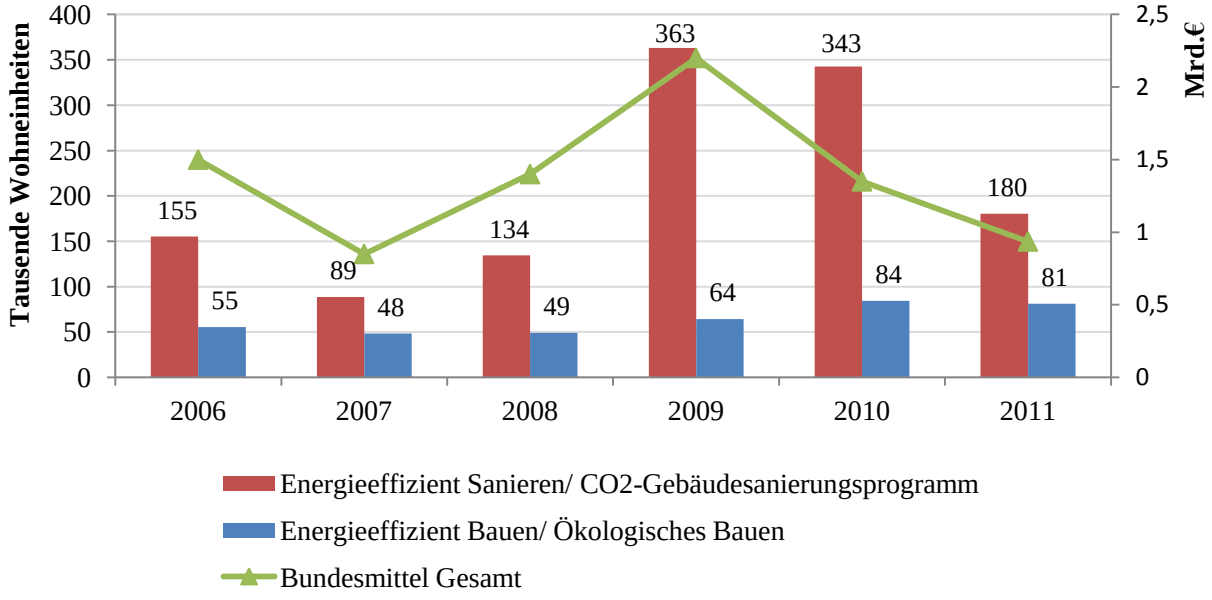
Quelle: Eigene Darstellung auf Basis von (KfW 2013a)

Weitere Förderprogramme ähnlicher Ausgestaltung richten sich an die energetische Sanierung von Gebäuden der kommunalen und sozialen Infrastruktur (*Energieeffizient Sanieren – Kommunen)* sowie Bildungseinrichtungen im Besitz von gemeinnützigen Organisationen und Kirchen (*Sozial Investieren – Energetische Gebäudesanierung)*. Im

[28] Für die Effizienzhauskategorie *KfW Denkmal (160)* besteht nur die Anforderung an den zu erreichenden Primärenergiebedarf (KfW 2013a).

KfW-Effizienzhausstandard errichtete Neubauten können über das Programm *Energieeffizientes Bauen* eine Förderung erhalten. Dabei gibt es die Effizienzhauskategorien *KfW 70, KfW 55, KfW 40,* welche eine entsprechende Unterschreitung der Anforderungen der geltenden *EnEV* an Neubauten erfordert.

EE-Wärmeerzeuger werden seit März 2013 im Rahmen des Programms *Energieeffizientes Sanieren – Ergänzungskredit* mit einem zinsvergünstigten Darlehen gefördert, das sich auch mit der Förderung des *MAP* kombinieren lässt (BMWi 2013).



Quelle: Eigene Darstellung; (Diefenbach et al. 2012; Nicolas Diefenbach et al. 2011)

Abbildung 18: Übersicht der Förderfälle in den KfW-Programmen zur energetischen Gebäudesanierung und Bauen in Anzahl Wohneinheiten

Die Zinsvergünstigungen und Tilgungszuschüsse der *KfW*-Programme werden über Bundesmittel finanziert, die sich von 2006 bis 2012 auf insgesamt 9,3 Milliarden Euro belaufen. Für das Jahr 2013 ist ein Budget von 1,8 Mrd. Euro vorgesehen[29] (BMVBS 2013).

[29] Seit 2011 werden die Programme *Energieeffizient Sanieren/Bauen* und das *Marktanreizprogramm* zum Teil über den Energie- und Klimafonds der Bundesregierung finanziert, der sich als Sondervermögen durch die Einnahmen des Emissionshandels speist (BMF 2013).

3.4 Vorschläge zur Weiterentwicklung und Ausweitung bestehender Politikinstrumente

Im Folgenden werden Möglichkeiten diskutiert, den bestehenden Rechts- und Förderrahmen für Energieeffizienz und EE-Wärme im Gebäudebereich auszuweiten. Dies kann entweder durch die Varianten bestehender oder die Einführung neuer Politikinstrumente geschehen.

3.4.1 Ausgestaltungsvarianten bestehender Instrumente

Die Analyse des derzeitigen Rechts- und Förderrahmens und die Wirkung der Variation zentraler Ausgestaltungparameter in Politikinstrumenten ist ein wichtiger Bestandteil dieser Arbeit. Tabelle 6 identifiziert daher zunächst die wichtigsten Ausgestaltungsparameter bestehender Politikinstrumente, die in der quantitativen Analyse in Kapitel 6 variiert werden.

Tabelle 6: Wichtige Ausgestaltungsparameter und -varianten bestehender Politikinstrumente

Politikinstrument	Ausgestaltungsparameter	Varianten
EEWärmeG	Anwendungsbereich	Neubau Gebäudebestand
	Nutzungspflichtauslöser	Grundlegende Sanierung Heizungstausch, Heizungsalter
	Mindestanteile	Variation der Mindestanteile für einzelne EE
MAP	Fördervolumen und -höhe	Jährliches Gesamtbudget Variation Förderhöhen einzelner EE Wärmeerzeuger
EnEV	Energetische Anforderungen	Mindestanforderung Neubau Mindestanforderung Bestand
	Zeitpunkt Novellierung	Einmalige/mehrfache Verschärfung im Zeitraum bis 2020
KfW Energieeffizient Sanieren/Bauen	Fördervolumen Fördertatbestände	Fokussierung auf Bestand Fokussierung auf hocheffiziente Sanierungen

Quelle: Eigene Darstellung

Wichtige Ausgestaltungsparameter finanzieller Instrumente sind die budgetäre Ausstattung, die einbezogenen Fördertatbestände und die jeweiligen Förderkonditionen für die einzelnen Technologien und Effizienzmaßnahmen. Bürger et al. (2012b) schlagen z. B. vor, die über die KfW ausgeschütteten Fördermittel zur Gebäudesanierung auf ambiti-

onierte Sanierung zu fokussieren. Als weitere Möglichkeit wird die generelle Konzentration der Fördermittel auf den Gebäudebestand zu Lasten der Förderung von energieeffizienten Neubauten genannt. Des Weiteren erscheint eine weitere Abstimmung zwischen den technologischen Fördertatbeständen zwischen den KfW-Programmen und dem *Marktanreizprogramm* sinnvoll. Von der KfW werden im Rahmen der Einzelmaßnahmenförderung auch fossile Brennwertkessel gefördert, welche den derzeitigen Marktstandard darstellen. Das *MAP* zielt wiederum auf eine Erhöhung der Wirtschaftlichkeit von EE-Wärmeerzeuger, welche jedoch gleichzeitig durch die Fördermittel der KfW verringert wird. Ein weiterer wichtiger Parameter ist die Ausgestaltung der Bedingungen des Förderzugangs, die bisher durch die Kreditvergabekriterien der jeweiligen Hausbank des Förderempfängers bestimmt werden.

Hinsichtlich der Anpassung der bestehenden ordnungsrechtlichen Instrumente stellt sich nicht zuletzt durch die europarechtlichen Anforderungen aus der *Erneuerbaren-Energien-Richtlinie* (vgl. 3.3.1) die Frage nach der Ausweitung des *EEWärmeG* auf den Gebäudebestand. In der Richtlinie ist als Auslösungstatbestand einer Nutzungspflicht für EE eine grundlegende Renovierung des Gebäudes genannt. Eine andere Ausgestaltungsvariante ist die Nutzungspflicht an den Austausch des Wärmeversorgungssystems zu koppeln, wie es auch im Wärmegesetz von Baden-Württemberg der Fall ist (EWärmeG 2007, §4(2)).

Die derzeitige Novelle der *EnEV* gibt bereits die Schritte für die Entwicklung der energetischen Anforderungen für die nächsten Jahre 2014 und 2016 vor, allerdings nur für den Neubau. Eine Ausgestaltungsvariante wäre die Anforderung für den Gebäudebestand sukzessive zu verschärfen (Bürger, Seebach, et al. 2012).

3.4.2 Optionen zur haushaltsunabhängigen Förderung von EE-Wärme

Die finanzielle Förderung mit öffentlichen Geldern ist wie dargestellt mit der Unsicherheit über die zur Verfügung stehenden Haushaltsmittel verbunden, was zu Abstrichen bei der Investitions- und Planungssicherheit für Investoren, Anlagenhersteller und Installateuren führt. Eine Verstetigung der Fördermittel kann durch eine haushaltsunabhängige Finanzierung des Fördersystems geschehen, wie es im Strombereich durch das *EEG* der Fall ist. Im Zusammenhang mit dem weiteren Ausbau erneuerbarer Wärme heißt es im *Energiekonzept* der Bundesregierung: „*Darüber hinaus prüfen wir eine haushaltsunabhängige Förderung durch ein Anreizsystem für erneuerbare Wärme innerhalb des Marktes“* (BMU and BMWI 2011: 23). Steinbach et al. (2013) präsentieren zwei Vorschläge haushaltsunabhängiger Förderinstrumente für erneuerbare Wärme, die auf einer Zahlungsverpflichtung bzw. einer quotalen Verpflichtung der Angebotssei-

te beruhen. Die geförderten Technologien entsprechen denen im *MAP,* das damit durch ein haushaltsunabhängiges Fördersystem ersetzt werden könnte.

Prämienmodell

Das sogenannte *Prämienmodell* ist konzeptionell an einem Einspeisungsvergütungssystem für EE-Strom angelehnt und garantiert eine feste Vergütung für erneuerbare Wärme, die allerdings als Einmalzahlung zum Zeitpunkt der Installation eines EE-Wärmeerzeugers ausgezahlt wird. Die Prämienforderungen der Investoren werden zentral über eine staatliche Stelle akkumuliert und an die *Inverkehrbringer*[30] fossiler Brennstoffe als Zahlungsverpflichtete weitergereicht. Die von den Förderempfängern eingeforderten Prämienvolumen werden in Abhängigkeit der jeweiligen energiesteuerpflichtigen Absatzmenge fossiler Brennstoffe auf die zahlungsverpflichteten Akteure verteilt. Diese können wiederum die damit verbundenen Zusatzkosten über die Verkaufspreise fossiler Brennstoffe auf den Endverbraucher wälzen. Das *Prämienmodell* entspricht damit einer Preissteuerung, die als Anreizwirkung auf der Nachfrageseite vergleichbar mit dem des *MAP* ist. Eine differenzierte Förderung einzelner Technologien wird durch technologiespezifische Prämien erreicht, die sich an den derzeitigen Investitionszuschüssen des *MAP* orientieren.

Portfoliomodell

Das *Portfoliomodell* entspricht hingegen einer Mengensteuerung und setzt eine quotale Verpflichtung auf die *Inverkehrbringer* fossiler Brennstoffe, eine bestimmte Menge an erneuerbaren Wärmemengen in den Markt zu bringen. Eine Quotenerfüllung wird durch die Implementierung technologischer Erfüllungsoptionen erreicht, die den im *MAP* geförderten Technologien entsprechen. Eine Nichterfüllung der Quote wird mit einer Strafzahlung belegt. Ein verpflichteter Akteur muss die Installation eines EE-Wärmeerzeugers über ein zentrales Anlagenregister als EE-Wertbescheinigung oder Zertifikat nachweisen, um die damit verbundenen errechneten erneubaren Wärmemengen zur Erfüllung der auferlegten Quote nachzuweisen. Die verpflichteten Akteure sind in der Regel nicht die Investoren von EE-Technologien, die zunächst im Besitz der entsprechenden Zertifikate sind. Die Investoren können diese jedoch direkt nach der Installation oder zu einem späteren Zeitpunkt übertragen. Die Übertragung muss dabei nicht zwangsläufig an einen verpflichteten Akteur erfolgen, sondern kann beispielsweise auch an den ausführenden Installateur, einen Wärme-Contracting-Dienstleister oder

---

[30] Inverkehrbringer fossiler Brennstoffe nach Definition des Energiesteuergesetzes (EnergieStG)

einen Technologieanbieter erfolgen. Im Gegensatz zum Prämienmodell werden keine fixen Vergütungen festgeschrieben, so dass sich die Höhe der Kompensation letztendlich am Markt bildet. Um eine technologiedifferenzierte Förderung zu erreichen, werden technologiespezifische Gewichtungsfaktoren vorgeschlagen, die beim Nachweis der Quote berücksichtigt werden. Ein zentraler Handelsmechanismus von Zertifikaten ist im *Portfoliomodell* nicht vorgesehen, ein bilateraler außerbörslicher Handel zwischen Marktteilnehmer sowie der Handel mit der Quotenverpflichtung[31] sind jedoch nicht ausgeschlossen. Die zusätzlichen Kosten für die verpflichteten Akteure durch gewährte Investitionszuschüsse, Informationskampagnen oder Energieberatung werden wie im *Prämienmodell* letztendlich durch eine Umlage auf die fossilen Brennstoffpreise von den Endverbrauchern getragen. Eine detaillierte Darstellung des Spektrums haushaltsunabhängiger Instrumente zur Förderung von Energieeffizienz im Gebäudebereich findet sich in Klinski et al. (2013).

3.4.3 Optionen zur haushaltsunabhängigen Förderung von Energieeffizienzmaßnahmen

Die Ausgestaltung neuer Förderinstrumente für Energieeffizienzmaßnahmen im Gebäudebereich wird ebenfalls vor dem Hintergrund einer Umstellung auf eine haushaltsunabhängige Finanzierung, die europarechtliche Rahmensetzung und den Erfahrungen mit entsprechenden Instrumenten aus anderen Mitgliedstaaten diskutiert. Ein Energieeffizienzverpflichtungssystem (Weißes Zertifikate-System), wie es in der *Energieeffizienz-Richtline* angeregt wird (vgl. 3.3.1), kann dabei als Rahmen für eine haushaltsunabhängige, marktbasierte Förderung von Effizienzmaßnahmen dienen. In einem solchen quotenbasierten Förderinstrument werden Akteure auf der Angebotsseite verpflichtet, ein jährliches Einsparziel zu erreichen. Die Erfüllung der Einsparquote kann je nach Ausgestaltung des Verpflichtungssystems durch unterschiedliche Maßnahmen erfolgen. Durch Einführung eines Handelsmechanismus („Weiße Zertifikate“) kann eine zusätzliche Flexibilisierung erreicht werden, indem Zertifikate zwischen Verpflichteten und auch mit nicht verpflichteten Dritten gehandelt und entsprechend angerechnet werden können (Bürger, Seebach, et al. 2012). Ob ein solches System die gewünschte Wirkung bezüglich Energieeffizienz im Gebäudebereich entfaltet und potentiell die derzeitige steuerfinanzierte Förderung der *KfW* ersetzen kann, hängt maßgeblich von der Systemausgestaltung ab. Die bestehenden Energieverpflichtungssysteme in Dänemark, Frankreich, Großbritannien und Italien unterscheiden sich hinsichtlich der einbe-

[31] Ein Handel mit einer Quotenverpflichtung ist auch im Rahmen der Biokraftstoffquote vorgesehen. Dies ermöglicht es, verpflichteten Akteuren durch die Übererfüllung der Quote, die Verpflichtung anderer Verpflichteter zu übernehmen (BImSchG: §37a (4)).

zogenen Sektoren, den Umfang und Art der Erfüllungsoptionen und ob eine Handelskomponente vorgesehen ist (Schlomann et al. 2012). Mögliche Ausgestaltungsvarianten eines Energieverpflichtungssystems für Deutschland werden von Bürger, Rohde et al. (2012) diskutiert und bewertet. Wie die vorgestellten haushaltsunabhängigen Förderinstrumente für EE-Wärme, stellt eine Energieeffizienzverpflichtung auch ein umlagebasiertes Finanzierungsinstrument dar, indem zusätzliche Kosten durch Erfüllung des Einsparziels auf die Endkunden der verpflichteten Akteure gewälzt werden. Verpflichtete können entweder Endverbraucher beliefernde Energieversorgungsunternehmen, *Inverkehrbringer* fossiler Brennstoffe oder die Verteilnetzbetreiber sein (Bürger, Rohde, et al. 2012). In Abhängigkeit der verpflichteten Gruppe wird die Umlage letztendlich auf den Endverbraucherpreis von Heizöl, Gas, Kohle, Fernwärme oder Strom umgelegt.

3.4.4 Steuerliche Abschreibung von Energieeffizienzmaßnahmen

Steuerliche Abschreibungen von Investitionen in energetischen Sanierungsmaßnahmen sind bisher nur im Rahmen der Sonderabschreibungsmöglichkeit von Baudenkmälern möglich (EStG :§ 7i). Diese bezieht sich aber nicht explizit auf Effizienzmaßnahmen, sondern schließt allgemein alle Baumaßnahmen ein, welche der Erhaltung des Gebäudes dienen. Eine allgemeine Abschreibungsfähigkeit von Effizienzmaßnahmen im Gebäudebereich würde hingegen ein finanzielles Förderinstrument darstellen, welches je nach Ausgestaltung für eine große Gruppe von Akteuren relevant wäre. Die wesentlichen Ausgestaltungsparameter eines Fördersystems zur steuerlichen Abschreibung sind in Tabelle 7 in Anlehnung an Bürger, Reitze, et al. (2012b) dargestellt.

Ein Gesetzesentwurf zur steuerlichen Förderung von energetischen Sanierungsmaßnahmen ist im Jahr 2011 durch den Bundesrat abgelehnt worden und im anschließenden Vermittlungsausschuss endgültig gescheitert. Der Gesetzesentwurf sah einen einkommensneutralen Steuerabzug (Steuergutschrift) der Investitionen von Vollsanierungen vor, welche mindestens im *KfW-Effizienzhaus 85* Standard resultieren (BT-Drs. 17/6074 2011). Kumulierbarkeit mit anderen öffentlichen Fördermitteln ist explizit ausgeschlossen. Die mit dem Instrument adressierten Akteure sind auf die Besitzer von selbstnutzenden Wohngebäuden mit Baujahr vor 1995 beschränkt

Tabelle 7: Ausgestaltungsparameter steuerlicher Förderung von Energieeffizienzmaßnahmen

Merkmal	Ausgestaltungsparameter
Art der steuerlichen Förderung	Steuerabschreibung
	Steuergutschrift
Umfang der Abschreibung	Degressiv
	Linear
Förderbedingungen	Variation der Förderhöhe
	Variation der Förderdauer
	Kumulierbarkeit mit anderer Förderung
Fördertatbestände	Ambitionsniveau Vollsanierung
	Teilsanierungen
	Heizkesseltausch
Zusätzliche Anforderungen	Energieberatung
	Nachweis durch Sachverständigen

Quelle: Eigene Darstellung; (Bürger, Reitze, et al. 2012)

.

4 Modelle zur Abbildung des Energiebedarfs und der Investitionsentscheidungen im Gebäudebereich

4.1 Einführung

Die Energiesystemmodellierung stellt Methoden zur Verfügung, den Energiebedarf in Gebäuden als Funktion unterschiedlicher Eingangsparameter innerhalb einer bestimmten Region und innerhalb eines definierten Zeithorizontes zu quantifizieren. Die Modelle sind dabei für eine Vielzahl von Anwendungen vorgesehen: Eine weit verbreitete Verwendung ist die Bestimmung der Anforderungen an die nationale oder regionale Energieversorgung oder die Änderung des Energiebedarfs durch die Verwendung neuer Technologien und Materialien (Swan and Ugursal 2009). Für die Konzeption von Förderinstrumenten und die Entscheidungsunterstützung der Politik sind diese Modelle ebenfalls sehr wertvoll, da Szenarien hinsichtlich der Wirkungen – Energieeinsparung und THG-Emissionsvermeidung – bestimmter Technologien und Maßnahmen aufgestellt werden können. Dieses Kapitel liefert einen Literaturüberblick zur Energiesystemmodellierung des Gebäudebereichs und Verfahren zur Simulation von Investitionsentscheidungen. Die in dieser Arbeit angewendete Methodik leitet sich dabei aus zwei Literaturströngen ab. Relevant sind zum einen Arbeiten zur Modellierung zukünftiger Energienachfrage auf Ebene des gesamten Gebäudesektors (Kavgic et al. 2010; Suganthi and Samuel 2012; Swan and Ugursal 2009; Zhao and Magoulès 2012), zum anderen Untersuchungen und Verfahren zur Simulation von Entscheidungsverhalten aus dem Bereich der Verhaltensökonomie. Der erste Teil gibt zunächst einen Überblick über Methoden der betriebswirtschaftlichen Investitionsrechnung und führt die zentralen Begriffe ein. Im zweiten Teil wird eine Klassifizierung der energiewirtschaftlichen Modelle für den Gebäudebereich aus der Literatur abgeleitet. Der dritte Teil stellt verhaltensökonomische Ansätze zur Modellierung von Investitionsentscheidungen sowie Fallstudien hinsichtlich des Entscheidungsverhaltens bei Energieeffizienzmaßnahmen und Wärmeversorgungssystemwahl dar. Daraus wird eine geeignete Methodik für die Untersuchung im Rahmen dieser Arbeit abgeleitet.

Die Inhalte des folgenden Kapitels sind teilweise im Rahmen eines Arbeitspapiers an anderer Stelle bereits veröffentlicht und zur Diskussion gestellt worden (Steinbach 2013b).

4.2 Methoden der Investitionsrechnung zur Beurteilung von Effizienzmaßnahmen und Wärmeversorgungsystemen

Im folgenden Abschnitt werden die im Rahmen dieser Arbeit untersuchten Investitionen und Investitionsentscheidungen anhand der betriebswirtschaftlichen Literatur klassifiziert und ausgewählte Methoden der Investitionsrechnung mit Relevanz für Investitionen im Gebäudebereich dargestellt.

4.2.1 Klassifizierung der Investitionsarten

In der Literatur werden Investitionen bezüglich ihrer Erscheinungsformen differenziert. Zur Klassifizierung dienen verschiedene Merkmale, die sich nach Kern (1974) in *periphere* und *zentrale Kriterien* unterscheiden. *Zentrale Kriterien* gliedern Investitionen hinsichtlich ihrer *Konsequenzen*, der *Interdependenzweite* im gesamten unternehmerischen Kontext sowie dem Ausmaß an Unsicherheit (Götze 2008). Periphere Kriterien beziehen sich hingegen auf das äußere Erscheinungsbild der Investitionen und differenzieren nach *Investitionsobjekt*, *Investitionsanlass* und *Investitionsbereich*[32]. Effizienzmaßnahmen an der Gebäudehülle und an Wärmeversorgungsystemen stellen hinsichtlich der Objektart *Realinvestitionen* dar und können mit Bezug auf den Investitionsanlass als *Ersatzinvestitionen* oder *Rationalisierungsinvestitionen* – sofern die Investition vor Ablauf der Nutzungsdauer erfolgt – charakterisiert werden[33]

Die Klassifizierung nach peripheren und zentralen Kriterien ist im Unternehmenskontext sinnvoll, um eine Vielzahl unterschiedlicher Investitionen eindeutig abzugrenzen und ein zweckmäßiges Vorgehen bei der Investitionsplanung und -rechnung zu wählen (Götze 2008). Im Bereich der privaten Haushalte, dem der größte Teil der Investoren im Gebäudebereich zuzuordnen ist, ist eine solche Klassifizierung nur bedingt anwendbar. Neben der Abgrenzung nach Art der Investition ist für die Auswahl von Bewertungsmethoden auch die Klassifizierung des Investitionsentscheidungsproblems relevant.

---

[32] Kern (1974) benennt *Investitionsumfang* als weiteres peripheres Kriterium. Götze (2008) zählt dies zu den zentralen Kriterien, da es die wirtschaftlichen Aspekte der Investitionen betrifft.

[33] Vgl. Götze (2008) für eine ausführliche Darstellung der unterschiedlichen Investitionsarten

4.2.2 Klassifizierung der Investitionsentscheidungen

Investitionsentscheidungen in Wärmeversorgungssysteme und Energieeffizienzmaßnahmen können als Einzelentscheidung im Sinne der Investitionsrechnung klassifiziert werden, die als Entscheidung „zwischen sich gegenseitig ausschließenden Alternativen“ (Kruschwitz 2011:5) definiert ist. In einem Gebäude wird nur ein Wärmeversorgungsystem installiert werden, d. h. ein Investor kann sich unter allen verfügbaren Optionen nur für ein System entscheiden[34]. Die Investitionen in Energieeffizienzmaßnahmen an der Gebäudehülle können ebenfalls als Einzelentscheidung klassifiziert werden, sofern die Investitionsoptionen als Effizienzpakete definiert werden, welche die Kombination der zu sanierenden Gebäudekomponenten mit der jeweiligen Dämmqualität umfasst. Abbildung 19 stellt schematisch die Strukturierung des Einzelentscheidungsproblems für die Investitionen in Energieeffizienzmaßnahmen an der Gebäudehülle dar. Aufgrund der Vielzahl an Kombinationen von zu sanierenden Komponenten und Qualitäten – Dämmdicken und Fensterqualitäten – ist die Aufstellung der möglichen Alternativen im Vergleich zum Entscheidungsproblem bei der Wärmeversorgung sehr aufwendig und resultiert in einer Vielzahl von Alternativen (vgl. 5.6.5).

Eine Klassifizierung als Programminvestitionen ist insofern auch möglich, sofern eine integrierte Betrachtung von Effizienzmaßnahmen an der Gebäudehülle und Wärmeversorgungssystemen stattfindet, so dass sich der Gebäudeeigentümer zwischen verschiedenen Kombinationen aus möglichen Wärmeversorgungssystemen und Effizienzmaßnahmen entscheidet. Die unterschiedlichen Kombinationsmöglichkeiten können jedoch auch als Alternativen formuliert werden, womit das Entscheidungsproblem auf eine Einzelentscheidung zurückzuführen ist.

Einzelentscheidungen werden im Weiteren danach unterschieden, ob die Nutzungsdauer feststeht oder selbst das Entscheidungsproblem darstellt. Gebäudekomponenten und Wärmeversorgungssysteme unterliegen einem kontinuierlichen Alterungsprozess, womit die maximale Verwendungsdauer durch die Funktionalität vorgeben ist und die Investitionsentscheidung als Wahlentscheidung charakterisiert werden kann (Kruschwitz 2011). Da technische und wirtschaftliche Nutzungsdauer jedoch unabhängig voneinander sind, kann die Entscheidung über die optimale Nutzungsdauer als Investitionsdauerentscheidung Teil des Entscheidungsproblems sein (Cypra 2009). In dieser Arbeit liegt der Fokus jedoch auf der Untersuchung der Wahlentscheidung zwischen unterschiedlichen Wärmeversorgungssystemen und Effizienzmaßnahmen, wäh-

---

[34] Ein Wärmeversorgungssystem kann dabei aus der Kombination unterschiedlicher Technologien bestehen, wie beispielsweise der Kombination aus einem Gaskessel mit einer Solarthermieanlage.

rend die Nutzungsdauer nicht als Teil des Investitionsentscheidungsproblems betrachtet wird, sondern über Ausfallwahrscheinlichkeitsverteilungen in der quantitativen Modellierung berücksichtigt wird (vgl. 5.4).

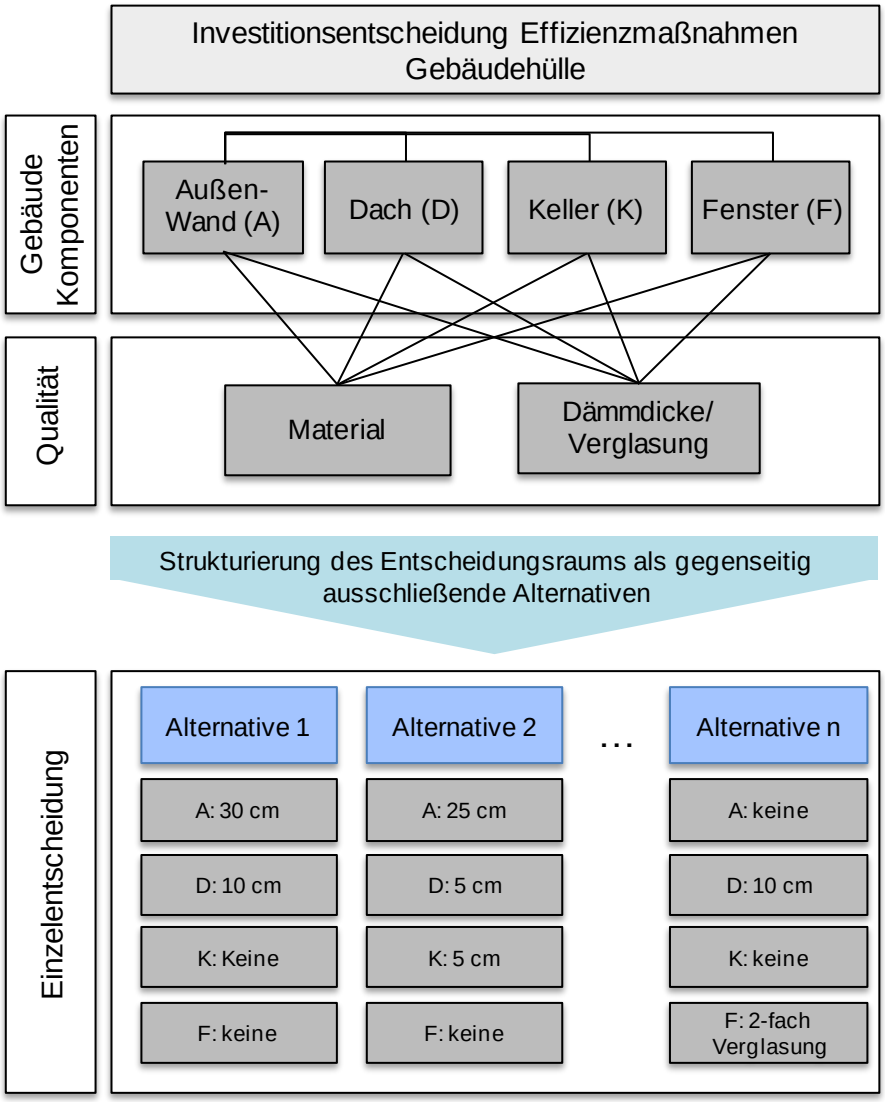


Abbildung 19: Klassifizierung der Investitionsentscheidung von Energieeffizienzmaßnahmen an der Gebäudehülle

4.2.3 Methoden zur Bewertung von Wahlentscheidungen

Die Investitionsrechnung stellt Verfahren zur Verfügung, mit denen Investitionshandlungen nach ökonomischen Aspekten – unter einer monetären Zielsetzung – beurteilt werden können. In der Betriebswirtschaftslehre ist der zahlungsorientierte Investitions-

begriff vorherrschend, der die Investitionen als Reihe von Ein- und Auszahlungen über unterschiedliche Zeitpunkte versteht, die immer mit einer Auszahlung beginnt. (Kruschwitz 2011).

In der Literatur wird oftmals eine Gliederung in *statische und dynamische* Methoden vorgenommen, wobei neuere Lehrbücher aufgrund der grundlegenden Kritik an der statischen Investitionsrechnung ganz auf deren Darstellung verzichten (vgl. Kruschwitz 2011). Im Unterschied zu dynamischen Verfahren, bleibt der zeitliche Verlauf der Ein- und Auszahlungen bei den statischen Verfahren unberücksichtigt. Im Folgenden werden Methoden dargestellt, welche eine hohe Anwendungsrelevanz im Bereich der Entscheidungsfindung im Gebäudebereich aufweisen, wozu auch die statische Amortisationsrechnung zählt. Für eine ausführliche Darstellung unterschiedlicher Methoden sei auf (Götze 2008) verwiesen.

Statische Amortisationsrechnung

Die statische Amortisationsrechnung setzt die Investitionsauszahlung in Verhältnis zu den Rückflüssen, welche sich bei Investitionen in Effizienzmaßnahmen aus der maßnahmenbedingten Energiekosteneinsparung ergeben. Die Amortisationsdauer entspricht damit formal dem Zeitpunkt, bei dem der Kapitaleinsatz durch die Rückflüsse wiedergewonnen wird (Götze 2008). Die relative Vorteilhaftigkeit der Investitionsalternativen wird durch den Vergleich der Amortisationsdauer ermittelt. Alternativ kann auch eine maximale Amortisationsdauer als Ausschlusskriterium dienen. Folgende Formel stellt die Berechnung der Amortisationszeit nach der Durchschnittsmethode[35] dar.

$$payback_time = \frac{I_{j,0}}{\bar{c} - \bar{c}_j} \qquad (2)$$

$I_{j,0}$ *Investitionsauszahlung der Effizienzmaßnahme j beim Anschaffungszeitpunkt (t=0)*

$\bar{c}$ *Durchschnittliche Energie- und Betriebskosten vor Effizienzmaßnahme j pro Jahr*

$\bar{c}_j$ *Durchschnittliche Energie- und Betriebskosten nach Durchführung der Effizienzmaßnahme j pro Jahr*

[35] Eine andere Berechnungsmethode ist die Kumulationsmethode, die nicht mit durchschnittlichen Rückflüssen rechnet, sondern die periodischen Rückflüsse aufaddiert, bis die Summe den Kapitaleinsatz übersteigt.

Die statische Amortisationsrechnung wird in der Praxis, insbesondere auch im Bereich energierelevanter Investitionen häufig eingesetzt, was zum einen auf die einfach anwendbare Berechnungsmethodik zurückzuführen ist, zum anderen in der Interpretation als Risikomaß im unternehmerischen Kontext, wobei Investitionsalternativen mit kürzeren Amortisationsdauern als risikoärmer eingestuft werden, da das „investierte Kapital weniger lange den aus der Unternehmenstätigkeit resultierenden Geschäfts- und Liquiditätsrisiken ausgesetzt ist“ (Pape 2011:333). Diese Interpretation ist jedoch kritisch, da das Risiko über die mit der Investitionsalternative verbundenen Zahlungshöhen selber nicht berücksichtigt wird. Des Weiteren bleiben Auswirkungen, die nicht innerhalb des Amortisationszeitraums liegen, unberücksichtigt, weswegen in der Theorie die Methode nur als ergänzendes Kriterium empfohlen (Götze 2008) wird oder von dessen Verwendung ganz abgeraten wird (Kruschwitz 2011).

Kapitalwert- und Annuitätenmethode

Die Kapitalwert- und Annuitätenmethode stellen Verfahren der dynamischen Investitionsrechnung dar und sind hinsichtlich der Beurteilung von Investitionsalternativen vollkommen äquivalent (Kruschwitz 2011). Allerdings basiert die Konstruktion auf unterschiedlicher Zielsetzung. Die Kapitalwertmethode stellt ein Endwertmodell dar, das aus dem Ziel einer Endwertvermögensmaximierung konstruiert ist. Der Kapitalwert einer Investition ist die Summe aller über den Betrachtungszeitraum anfallenden Ein- und Auszahlungen, die auf den Zeitpunkt des Investitionsbeginns mit einem einheitlichen Kalkulationszinssatz diskontiert werden.

$$NPV = \sum_{t=0}^{T} z_t \cdot (1+r)^{-t} \qquad (3)$$

z_t *Ein- und Auszahlungen zum Zeitpunkt t*

r *Kalkulatorischer Zinssatz*

T *Planungshorizont/Nutzungsdauer*

Die Annuitätenmethode unterstellt hingegen eine Maximierung des Einkommensniveaus, wobei der Kapitalwert der Investition über den Betrachtungszeitraum verteilt wird. In der Beurteilung von Ersatz- oder Neuinvestitionen gebäudetechnischer Anla-

gen sind kapital-, bedarfs- und betriebsgebundene Kosten zu berücksichtigen[36] (vgl. VDI 2067-1 2000). Die Annuität der Investitionsalternativen wird in diesem Kontext auch als Annuität der Jahresgesamtzahlungen (VDI 2067-1 2000) oder Annuität der Lebenszykluskosten[37] (vgl. 4.4.1) bezeichnet.

$$total_cost_j = \left(I_{j,0} + \sum_{t=0}^{T} c_{j,t} \cdot (1+r)^{-t} \right) \cdot \frac{r}{(1-(1-r)^{-T}} \qquad (4)$$

Wird über den Planungshorizont eine konstante jährliche Preisänderung bei Energie- und Betriebskosten angenommen, kann die Berechnung auch auf Basis der Energie- und Betriebskosten zum Anschaffungszeitpunkt mittels des preisdynamischen Barwertfaktors erfolgen.

$$total_cost_j = \left(I_{j,0} + c_{j,0} \cdot b_c \right) \cdot \frac{r}{(1-(1-r)^{-T}} \qquad (5)$$

$$b_c = \frac{1 - \left(\frac{1-p}{1-r}\right)^T}{r-p}$$

$c_{j,0}$ *Energie- und Betriebskosten in $t = 0$*

r *Kalkulatorischer Zinssatz*

p *Änderung der Energie- und Betriebskosten pro Jahr*

Durch Division mit der bereitgestellten Wärmenutzenergie ergeben sich analog zur Berechnung der Stromgestehungskosten (Konstantin 2009) die spezifischen Wärmebereitstellungskosten.

Zur Beurteilung von Effizienzmaßnahmen an der Gebäudehülle kann die Berechnung genauso durchgeführt werden, so dass die Investitionsalternativen anhand der resultierenden Jahresvollkosten verglichen werden. Da Effizienzmaßnahmen jedoch in der Regel an ohnehin erforderliche bauliche Instandsetzungsmaßnahmen[38] zum Investitionszeitpunkt gekoppelt sind (Kopplungsprinzip), werden zur Beurteilung der Wirtschaft-

---

36 Zudem sind sonstige Kosten wie Versicherungen, Abgaben und Steuern, die noch nicht erfasst sind und sich zwischen den Investitionsalternativen unterscheiden, ebenfalls erfasst (VDI 2067-1 2000). Bedarfsgebundene Kosten entsprechen den Energiekosten.

37 Levelized life cycle costs (vgl. Rivers und Jaccard 2005)

38 Zu ohnehin anfallenden Investitionen bei einer energetischen Außenwandsanierung zählen z. B. die Baustelleneinrichtung und Gerüstarbeiten sowie Fassadenreinigung und Putzdämmung (vgl. Hinz 2011).

lichkeit oftmals nur die energiebedingten Mehrkosten einerseits und die Verbrauchs- und Betriebskosteneinsparungen anderseits berücksichtigt (Enseling 2003; Hinz 2011).

$$add_cost_j = \left(I_j - I_j^{INST} + \sum_{t=0}^{T} c_{j,t} \cdot (1+r)^{-t} \right) \cdot \frac{r}{(1-(1-r)^{-T}} \qquad (6)$$

I_j^{INST} *Investitionsauszahlung der ohnehin erforderlichen baulichen Maßnahmen*

4.3 Klassifizierung von Energiesystemmodellen für den Gebäudebereich

Energiesystemmodelle können anhand ihres Anwendungsbereichs und dem zugrundeliegenden Modellparadigma unterschieden werden. Das geeignete Modelldesign hängt von der jeweiligen Forschungsfrage ab; der Fokus kann beispielsweise auf einer detaillierten Darstellung eines Energiesektors innerhalb eines Landes liegen oder auf den Abhängigkeiten zwischen verschiedenen Sektoren und geographischen Regionen. In Abbildung 20 wird eine Klassifizierung der Energiesystemmodelle für den Gebäudesektor auf Basis der Literatur abgeleitet. Grundsätzlich lassen sich die Modellparadigmen, mit denen die Interaktion zwischen Energie- und Wirtschaftssystem dargestellt werden, nach den beiden Ansätzen *top-down* und *bottom-up* unterscheiden, wobei ersteres für aggregierte und letzteres für disaggregierte Modelle steht (IPCC 1995). Die Unterscheidung der Ansätze ist daher weniger konzeptuell, sondern vielmehr durch die verschiedenen sektoralen und technologischen Aggregationsebenen begründet (Böhringer und Rutherford 2009).

Ein dem *Top-down*-Ansatz folgendes Modell berücksichtigt die Energienachfrage in Gebäuden im Ganzen als ein Energiebedarfssektor (Swan and Ugursal 2009). Individuelle Anwendungen auf der Endnutzerebene bleiben dabei unberücksichtigt. Die Haupttreiber für Energienachfrage und Technologiediffusion sind in diesen Modellen makroökonomische und demographische Indikatoren, wie Bruttoinlandsprodukt, Haushaltseinkommen, Preisindizes und Bevölkerungsentwicklung sowie Abriss- und Neubauraten. Jedoch bestehen Grenzen in der Modellierung von diskontinuierlichen Vorgängen wie dem möglichen Fortschritt durch neue Technologien. Swan und Ugursal (2009) unterscheiden *Top-down*-Modelle für den Gebäudesektor anhand der erklärenden Variablen in ökonometrische (*econometric*) und technologiebasierte Ansätze (*technological)*. Beispiele für *Top-down*-Modelluntersuchung des Gebäudebereichs sind in Haas und Schipper (1998) oder Siller et al. (2007) zu finden, wobei letzteres einen technologiebasierten Ansatz darstellt

Bottom-up-Modelle beschreiben das Energiesystem- und die Energienachfrage hingegen in größerer Detaillierung, indem disaggregierte Daten auf der Ebene individueller Endnutzer, Gebäudeklassen und Technologien Verwendung finden. Im Gegensatz zu *Top-down*-Modellen bleiben jedoch typischerweise Interdependenzen mit anderen Sektoren oder nicht energierelevantes Verbraucherverhalten unberücksichtigt (IPCC 1995). Im Vergleich zu dem *Top-down*-Ansatz eignet sich dieser Ansatz daher insbesondere für eine detaillierte sektorale Energiesystem- und Energienachfrageanalyse des Gebäudebereichs und der Modellierung von Investitionsentscheidung. *Bottom-up*-Modelle lassen sich einerseits hinsichtlich der verwendeten Methoden zur Ermittlung des Energiebedarfs in Gebäuden unterscheiden, anderseits kann eine Unterscheidung anhand des zentralen Modellierungsansatzes erfolgen, welcher die Art der dynamischen Abbildung von Technologiediffusion und Energiebedarfsentwicklung über die Zeit bestimmt.

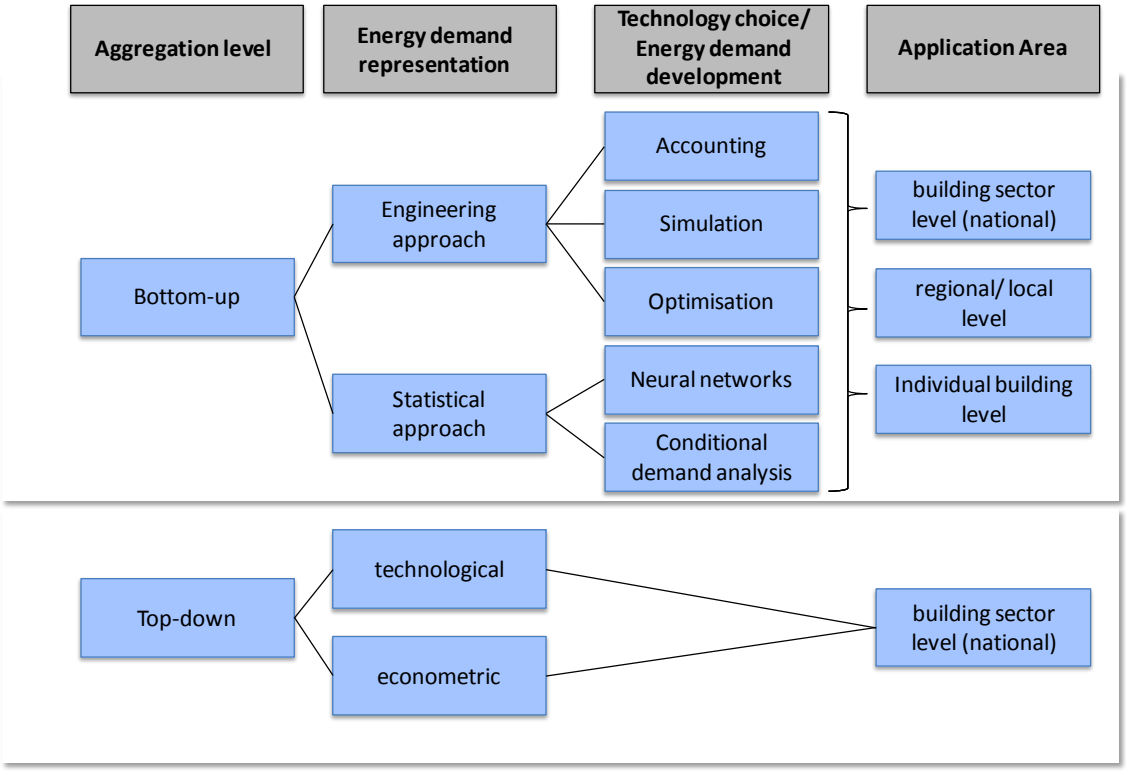


Abbildung 20: Klassifizierung von Energiesystemmodellierung für den Gebäudesektor

Die methodischen Ansätze der Modelle basieren in der Regel entweder auf statistischen (*statistical approach*) oder bauphysikalischen (*building physics based/engineering approach*) Eingangsdaten (Kavgic et al. 2010; Swan und Ugursal 2009).

Modelle mit statistischen Ansätzen verwenden beispielsweise Abrechnungsdaten von Energieversorgern, um den Energieverbrauch als Funktion von bestimmten Gebäudespezifika anzuwenden. Als statistische Methoden werden dabei verschiedene Regressionstechniken angewendet. Modelle basierend auf bauphysikalischen Eingangsdaten stellen eine Methode dar, den Energieverbrauch des Gebäudebereichs ohne historische Verbrauchsdaten zu ermitteln (Swan und Ugursal 2009). In den Modellen wird dabei entweder eine repräsentative Auswahl an Gebäuden der zu untersuchenden Region abgebildet oder der gesamte Gebäudebestand nach Alter, Größe, Gebäudetyp etc. eingeteilt. Als Eingangsparameter werden dafür u. a. Geometrie und Nutzung der Gebäude, U-Werte sowie technische Merkmale der eingesetzten Technologien benötigt. Eine detaillierte Beschreibung einiger bekannter *Bottom-up*-Modelle zum Energieverbrauch im Gebäudebereich liefern Kavgic et al. (2010).

Bottom-up-Energiesystemmodelle stellen ein wichtiges Werkzeug hinsichtlich der Bewertung von technologischen und politischen Maßnahmen dar, indem diese explizit die Auswirkungen auf den Energieverbrauch und CO_2-Emissionen quantifizieren. Dabei gelten technoökonomische Variablen als Hauptdeterminanten für die Technologiewahl und Investitionsentscheidung. Mögliche relevante soziale und psychologische Kriterien werden modellendogen bisher nicht berücksichtigt.

4.3.1 Ermittlung des Gebäudeenergiebedarfs

Im Folgenden werden die Methoden zur Bestimmung des Gebäudeenergiebedarfs in *Bottom-up*-Energiesystemmodelle und deren Anwendungen gegenübergestellt.

Statische Verfahren

Im statistischen Ansatz werden Stichprobenhebungen von Gebäuden sowie nationale oder regionale Indikatoren wie Energiepreise oder Einkommen verwendet, um Korrelationen zwischen Gebäudecharakteristiken und Energienachfrage abzuleiten. Typische Datenquellen sind historische Daten aus Gebäudeerhebungen wie dem Mikrozensus in Deutschland oder Energieverbrauchsrechnungen, die durch Energieversorgungsunternehmen bereitgestellt werden. Die angewendeten statistischen Methoden sind dabei ähnlich zu denen von *Top-down*-Modellen, allerdings unterscheidet sich das Aggregationslevel hinsichtlich einer Aufgliederung nach unterschiedlichen Energiebedarfsanwendungen, Technologien und Gebäudetypen.

Bestehende Modelle wenden zur Bestimmung des Energiebedarfs als Funktion der relevanten Parameter überwiegend Regressionstechniken an (Swan and Ugursal 2009). Eine gut dokumentierte Methode von statistischen *Bottom-up*-Modellen stellt die sogenannte *Conditional Demand Analysis (CDA)* dar, welche von Parti und Parti

(1980) zur Bestimmung des anwendungsspezifischen Strombedarfs in Haushalten entwickelt wurde. Die Methode verwendet als erklärende Variablen für den Energiebedarf in Gebäuden, Wohnungen oder Haushalten Daten zur bestehenden Geräteausstattung, zu den technischen Eigenschaften der Geräte sowie zum Nutzungsverhalten der Bewohner hinsichtlich der einzelnen Geräte (Aydinalp-Koksal and Ugursal 2008). Der Hauptfokus von *CDA*-Modellen liegt auf der Analyse des Energiebedarfs für Haushaltsgeräte, Raumwärme und Warmwasser im Haushaltssektor, teilweise in einer hohen zeitlichen Auflösung von einer Stunde oder weniger. Die meisten bestehenden Modelle sind jedoch nicht dafür entworfen, eine umfassende Abbildung des Energiebedarfs für den gesamten Gebäude- oder Wohngebäudesektor zu liefern, sondern werden angewendet, um den Zusammenhang zwischen Energiebedarf mit klimatischen Bedingungen, ökonomischen Daten (z. B. Gas- und Strompreise) oder soziodemographischen Variablen zu untersuchen. Ein *CDA*-Modell auf nationaler Ebene wird von Aydinalp-Koksal und Ugursal (2008) für den Wohngebäudesektor in Kanada präsentiert.

Künstliche neuronale Netzwerke (*KNN*) stellen eine weitere Methode zur Abbildung des Gebäudeenergiebedarfs auf Basis von historischen Daten dar (Swan and Ugursal 2009; Zhao and Magoulès 2012). Neuronale Netzwerke sind eine weitverbreitete Methode aus dem Bereich des maschinellen Lernens, welche Mustererkennung in Rohdaten und das Aufdecken von komplexen, nicht-linearen Zusammenhängen zwischen Input- und Output-Daten ermöglicht. Der Ansatz versucht die biologischen Prozesse zur Informationsverarbeitung im Gehirn in einem mathematischen Modell zu imitieren. Um den Zusammenhang zwischen Input (erklärenden Variablen) und Output (erklärte Variable) zu ermitteln, muss das Netzwerk mit historischen Daten trainiert werden. Im Bereich der Gebäudeenergiebedarfsmodellierung werden *KNN*-Modelle insbesondere zur Prognose der Energiebedarfsentwicklung auf Einzelgebäudeebene und von fluktuierenden Strombedarfen eingesetzt. Ein auf der *KNN*-Methode basierendes Sektormodell für die Entwicklung des Raumwärme- und Wärmebedarfs wird von Aydinalp-Koksal und Ugursal (2008) vorgeschlagen, indem 28 verschiede Inputeinheiten verwendet werden einschließlich Gebäude- und Wohnungscharakteristika, Eigenschaften des Wärmeversorgungssystems sowie sozioökonomische Parameter der Haushalte.

Weitere Methoden zur Modellierung des Gebäudeenergiebedarfs stellen *Support Vector Machines* und *Grey System Theory* dar (Zhao and Magoulès 2012). Da sich die Anwendung dieser Methoden allerdings auf die Ebene der Einzelgebäude beschränkt, werden sie an dieser Stelle nicht weiter dargestellt.

Bauphysikalische Verfahren

Modelle mit einem bauphysikalischen Ansatz wenden thermodynamische Funktionen zusammen mit detailliertem Wissen zu technologischen und gebäudespezifischen Parametern, wie z. B. Wirkungsgrade und Leistungen der installierten Systeme, Wärmedurchgänge und solare Einstrahlung an, um den Energiebedarf zu berechnen. Im Gegensatz zu statistischen Modellen sind historische Energiebedarfsdaten daher im bauphysikalischen Ansatz höchstens zur Kalibrierung bestimmter Eingangsdaten nötig (Swan and Ugursal 2009). Für eine Energienachfragemodellierung von Raumwärme- und Warmwasserbedarf auf nationaler Ebene erfordert dieser Ansatz die Definition von entsprechenden Referenztechnologien für die Wärmeversorgung und repräsentative Anteile von Referenzgebäudetypen am gesamten Gebäudebestand. In der Literatur werden Modelle mit bauphysikalischem Ansatz teilweise weiter hinsichtlich des Detaillierungsgrades der Eingangsdaten und der bauphysikalischen Berechnungsmethoden unterteilt. Die Kategorisierung von Swan und Ugursal (2009) unterscheidet zwischen Ansätzen auf Basis von Verteilungsfunktionen („distributions“) und Referenzgebäudetypen („archetypes“ und „samples“).

Der erste Ansatz verwendet Verteilungsfunktionen auf Grundlage von Marktanteilen installierter Versorgungssysteme und Geräte, um den Energiebedarf auf Ebene der einzelnen Energieanwendungen abzuleiten. Die individuellen Anwendungen werden jedoch unabhängig von den jeweiligen Systemgrenzen (Gebäude oder Wohnung) betrachtet, wodurch Einflüsse der Gebäudehülle auf den Energiebedarf, wie Wärmedurchgänge der Bauteile, unberücksichtigt bleiben.

Um den Raumwärmebedarf zu modellieren, sind bauphysikalische Modelle auf Basis von Referenzgebäudetypen besser geeignet, da geometrische Ausführung, thermische Eigenschaften und Betriebsparameter in einer integrierten Simulation von Gebäuden und Versorgungssystemen berücksichtigt werden (Parekh 2005). Die in der Literatur vorgenommene Gliederung bauphysikalischer Modelle in „archetypes“ und „samples“ ist eher durch den Grad der Disaggregation von Referenzgebäuden und Technologien zu begründen als durch unterschiedliche methodische Ansätze. Beide Verfahren erfordern die Anwendung oder Implementierung eines thermischen Gebäudesimulationsprogramms. *Archetypes*-Modelle bilden den Gebäudebestand durch eine begrenzte Anzahl von Referenzgebäuden ab, welche beispielsweise anhand der Gebäudetypen (Einfamilienhaus, Mehrfamilienhaus etc.), des Baualters und der Art der Wärmeversorgungssysteme gegliedert werden. Für jedes Gebäude wird eine thermische Simulation auf Basis der bauphysikalischen Parameter durchgeführt, wie sie auch für reale Gebäude, beispielsweise zur Erstellung des Energiepasses, angewendet wird. Die Anzahl der Referenzgebäude hängt vom angestrebten Detaillierungsgrad sowie der Datenver-

fügbarkeit ab. Der Unterschied zu den in der Taxonomie von Swan und Ugursal (2009) als „samples“ bezeichneten bauphysikalischen Modelle ist, dass Stichproben realer Gebäude verwendet werden – z. B. von einer Wohnungszählung wie dem Mikrozensus – ohne eine weitere Gliederung in Referenzgebäude vorzunehmen.

4.3.2 Energienachfrageentwicklung und Technologiewahl

Mundaca et al. (2010) kategorisieren *Bottom-up*-Energiesystemmodelle für den Gebäudebereich anhand des zentralen Modellierungsansatzes in Simulationsmodelle (simulation), Optimierungsmodelle (optimisation), Bilanzierungsmodelle (accounting) und Hybridmodelle (hybrid). Eine vergleichbare Taxonomie wird auch in der Literatur zur Energiesystemmodellierung des Strombereichs angewendet (vgl. Sensfuß 2007).

Simulationsmodelle

Bottom-up-Simulationsmodelle bilden Energienachfrage und Energiebereitstellung in einer deskriptiven Weise (Mundaca et al. 2010), unter Berücksichtigung mikroökonomischer Entscheidungsfindung und unterschiedlicher Treiber technologischer Diffusion. Dementsprechend hat der Entwurf von Simulationsmodellen das Ziel, ein bestimmtes System zu reproduzieren – z. B. den Gebäudebereich – und dessen Entwicklung und Transformation in der realen Welt unter verschiedenen exogenen Szenario-Variablen zu untersuchen.

Optimierungsmodelle

Im Gegensatz dazu folgen Optimierungsmodelle einem präskriptiven Ansatz. Das Ziel ist es, verschiedene kostenoptimale Systemzustände unter Berücksichtigung unterschiedlicher Marktbedingungen und bestimmter Politikziele abzuleiten. Individuelle Investitionsentscheidungen werden daher in Optimierungsmodellen für den Gebäudesektor nicht erfasst. Stattdessen wird ein rationales Verhalten der Akteure unterstellt, beispielsweise indem die Minimierung von Jahresvollkosten als Zielvariable und Haupttreiber der Technologiewahl angenommen wird.

Bilanzierungsmodelle

Bilanzierung stellt den dritten Modellierungsansatz dar. Der Hauptunterschied zu Optimierungs- und Simulationsmodellen ist die exogen Vorgabe der Technologiewahl bzw. der Marktanteile durch den Modellanwender. Bilanzierungsmodelle können beispielsweise angewendet werden, um den Effekt der Adaption effizienter Wärmeversorgungssysteme unter Berücksichtigung der entsprechenden Austauschzyklen abzuschätzen oder den Einfluss einer Temperaturänderung durch den Klimawandel auf den Gebäu-

deenergiebedarf zu untersuchen (Olonscheck et al. 2011). Beispiele für die Anwendung von B*ottom-up*-Bilanzierungsmodellen zur Ermittlung von Energiebedarfsszenarien des deutschen Gebäudebestandes bis zum Jahr 2050 finden sich in McKenna et al. (2013) und Bettgenhäuser (2013).

Hybridmodelle

Hybridmodelle können nicht eindeutig einer der drei vorgestellten Kategorien zugeordnet werden, da unterschiedliche Modellierungsansätze kombiniert werden. Die Bezeichnung wird auch bei einer Integration von *Top-down*- und *Bottom-up*-Ansätzen verwendet; beispielsweise wenn makroökonomische Variablen nicht als exogene Parameter vorgegeben werden, sondern endogen mit einem Gleichgewichtsmodell bestimmt werden (Böhringer and Rutherford 2009).

4.3.3 Synthese zu den Modellansätzen

Der dargestellte Überblick zeigt, dass eine Reihe unterschiedlicher Modellansätze angewendet werden kann, um den Gebäudebereich als Energiesystem zu untersuchen. Der geeignete Modellentwurf hängt dabei von der jeweiligen Forschungsfrage und dem Umfang der Analyse ab. Bilanzierungs- und Optimierungsmodelle sind insbesondere geeignet, um normative Szenarien und Entwicklungspfade abzuleiten, während Simulationsmodelle generell einen explorativen Ansatz folgen.

In dieser Arbeit soll die Wirkung unterschiedlicher Politikinstrumente auf die Entwicklung erneuerbarer Energien und den Rückgang des Energiebedarfs analysiert werden. Die Anforderung an einen geeigneten Ansatz ist daher zunächst ein deskriptiver Modellentwurf, der eine explizite Abbildung von Technologien erlaubt. Hinsichtlich der Berücksichtigung bestehender Hemmnisse und akteursspezifischem Investitionsverhalten ist zudem eine endogene Bestimmung der Technologiewahl Voraussetzung. Ein geeigneter Modellansatz erscheint daher ein *Bottom-up*-Simulationsmodell, mit dem der gesamte Gebäudebereich auf nationaler Ebene disaggregiert durch technologiespezifische und bauphysikalische Parameter abgebildet werden kann.

Allerdings stellt sich die Frage, inwieweit individuelles Entscheidungsverhalten in bestehenden Modellansätzen Berücksichtigung findet und welche Methoden zu dessen Modellierung bestehen. Im folgenden Abschnitt werden daher Methoden zur Modellierung der Technologiewahl sowie zur Analyse und Berücksichtigung von akteursspezifischem Investitionsverhalten dargestellt.

4.4 Modellierung des Investitionsentscheidungsverhaltens

Dieser Abschnitt analysiert unterschiedliche Ansätze der Abbildung von Technologiewahl und deren Hauptdeterminanten in Energiesystemmodellen für den Gebäudebereich. Der Fokus liegt dabei auf Ansätzen zur Simulation der Diffusion konkurrierender Technologien vor dem Hintergrund unterschiedlicher Entscheidungsträger. Zunächst werden die zentralen Determinanten der Technologiewahl der in der Literatur beschriebenen Simulationsmodelle für den Gebäudebereich ausgeführt, bevor Ansätze zur Modellierung akteursspezifischen Entscheidungsverhaltens dargestellt werden.

4.4.1 Simulation der Technologiewahl in bestehenden Energiesystemmodellen für den Gebäudebereich

Bestehende *Bottom-up*-Simulationsmodelle für den Gebäudebereich auf nationaler bzw. Sektorebene sind überwiegend aus einer technoökonomischen Perspektive entworfen, welche einen rational agierenden Akteur bei der Investitionsentscheidung unterstellen (Mundaca et al. 2010; Wilson and Dowlatabadi 2007). Die Annuität der Lebenszykluskosten[39] als Funktion von technologischen und gebäudespezifischen Parametern ist dabei die zentrale Determinante der Technologiewahl. Der Unterschied zu einem Optimierungsansatz ist, dass auf Basis resultierender Kosten Marktanteile mittels einer Verteilungsfunktion berechnet werden anstatt der Zuweisung des gesamten Marktanteils zu der der kostenminimalen Technologiealternative.

Das *Residential Sector Demand Module* des *National Energy Modelling System (NEMS)* wendet eine lineare logarithmische Funktion an, um die Marktanteile von Wärmeversorgungssystemen für jede Simulationsperiode zu ermitteln (DOI/EIA 2010)[40]. Es unterscheidet Referenzgebäude nach Gebäudetyp, Baualtersklassen und der Zensusregion, welche sich hinsichtlich der klimatischen Bedingungen unterscheidet. Bei der Berechnung der Marktanteile werden neben Jahresvollkosten die Marktanteile der Technologien in der Vorperiode sowie aggregierte Konsumentenpräferenzen für Technologien berücksichtigt. Letzteres wird als Kalibrierungsvariable eingeführt, die auf Basis der historischen Marktanteile gesetzt wird.

$$ms_{j,bu,r,t} = \frac{(1-l)\cdot ms_{j,bu,r,t-1} + l\cdot\ e^{(c_{j,}+\ \lambda_j \cdot LCC_{j,bu,r,t})}}{\sum_{k=1}^{J}\left((1-l)\cdot ms_{k,bu,r,t-1} + l\cdot\ e^{(c_{j,}+\ \lambda_k \cdot LCC_{j,bu,r,t})}\right)} \qquad (7)$$

---

39 Diese setzt sich aus der auf den Investitionszeitpunkt diskontierten Annuität der Investitionen und den jährlichen Energie- und Betriebskosten zusammen (vgl. 5.5.2).

40 Das Modell wird u. a. für den *Annual Energy Outlook* des Energieministeriums der Vereinigten Staaten eingesetzt.

$ms_{j,bu,r,t}$	*Marktanteile von Technologie j in Gebäude bu und Zensusregion r zum Zeitpunkt t*
$LCC_{j,b,r,t}$	*Annuität der Lebenszykluskosten (Jahresvollkosten)*
c_j	*Kalibrierungsvariable der aggregierten Präferenzen für bestimmte Technologien*
l	*Gewichtung der Marktanteile der vorherigen Periode*
λ_j	*Skalierungsvariable der Log-Linear Funktion > 0*
J	*Anzahl konkurrierender Technologien*

Das Gebäudemodul des *Canadian Integrated Modelilling System (CIMS)* ermittelt die Marktanteile auf Basis einer Potenzfunktion aus Jahresvollkosten und einem immateriellen Kostenteil, welcher nicht-ökonomische Attribute der Alternativen operationalisieren soll (Bataille 2005; Gamtessa 2006). Giraudet et al. (2012) verwenden den gleichen funktionellen Zusammenhang, um die Anteile unterschiedlicher Energieeffizienzoptionen in dem Modell *REF-IF* zu ermitteln.

$$ms_j = \frac{(LCC_{j,t} + I_{j,t})^{-\lambda}}{\sum_{k=1}^{J}(LCC_{k,t} + I_{k,t})^{-\lambda}} \qquad (8)$$

$I_{j,t}$	*Immaterieller Kostenanteil zur Operationalisierung nicht-ökonomischer Attribute*

Der Steigung der Marktanteilskurve wird durch den Skalierungsparameter (v) bestimmt und kann als Maß der Heterogenität des Marktes interpretiert werden (Gamtessa 2006) oder generell als Relevanz der Entscheidungsvariablen bei der Technologiewahl. Um den Parameter für das *CIMS* Modell zu bestimmen, führen Rivers und Jaccard (2006) eine *Discrete-Choice*-Analyse durch, welche im nächsten Abschnitt als Methode zur Präferenzmessung dargestellt wird (vgl. 4.4.2).

Durch die *Discrete-Choice*-Modellierung motiviert, wenden eine Reihe neuerer Energiesystemmodelle für den Gebäudebereich eine logistische Verteilungsfunktion zur Bestimmung der aggregierten Marktanteile der Technologien an – anstelle der Anwendung als Präferenzmessung (Bauermann and Weber 2013; Deforest et al. 2010; Elsland et al. 2013; Henkel 2012; Kranzl et al. 2013). Die folgende Formel zeigt die

Berechnung der Marktanteile auf Basis einer logistischen Verteilungsfunktion, deren methodische Fundierung einem *multinominalen Logit-Modell* entspricht (Train 2003). Die Funktion wird im Kontext der empirischen Modelle zur Präferenzmessung im nächsten Abschnitt hergeleitet.

$$ms_{j,bu,t} = \frac{e^{-\lambda \cdot V_{j,bu,t}}}{\sum_{j=1}^{N} e^{-\lambda \cdot V_{j,bu,t}}} \qquad (9)$$

$V_{j,bu,t}$ *Ausprägung der Entscheidungsvariablen/Nutzwert der Technologie*

Die zentralen Entscheidungsvariablen der bestehenden Energiesystemmodelle mit logistischer Verteilungsfunktion sind ebenfalls Jahresvollkosten, deren Berechnung sich nur teilweise zwischen den Modellen unterscheidet, um nicht ökonomische Hemmnisse und Präferenzen zu berücksichtigen[41].

Alle beschriebenen Ansätze der Simulationsmodelle beziehen bei der Ermittlung von Marktanteilen in unterschiedlichem Ausmaß Variablen ein, welche Präferenzen oder nicht-ökonomische Attribute von Technologieoptionen reflektieren. Allerdings wird nur zwischen Investitionsobjekten differenziert – aggregierte Präferenz im Markt – statt zwischen den Entscheidungsträgern. Dementsprechend ist die Simulation der Technologiewahl in den dargestellten Modellen zwar disaggregiert auf der Ebene der Technologien und Gebäude, jedoch nicht auf der Ebene der Investoren.

Eine detaillierte Simulation des Wohngebäudebestandes und der Haushalte in Deutschland bis zum Jahr 2030 wird durch Stengel (2014) mit dem *akteursbasierten Wohngebäude- und Haushaltsmodell AWOHM* präsentiert. Das Modell baut auf den *Mikrozensus Daten* des Statistischen Bundesamtes auf. Wohngebäude werden nicht nur anhand energetischer und geometrischer Eigenschaften differenziert, sondern auch anhand der Eigentümerstruktur. Die Investitionsentscheidung in Sanierungsmaßnahmen wird dabei auf Basis einer multikriteriellen Nutzenfunktion aus Sicht der Wohngebäudeeigentümer modelliert (Stengel 2014:207), welche in Abhängigkeit der Eigentümer unterschiedliche ökonomische, umweltrelevante und technologiespezifische Kriterien berücksichtigt.

---

41 Kranzl et al. (2013) korrigieren beispielsweise die Jahresvollkosten um technologiespezifische Parameter, um aggregierte Präferenzen zu berücksichtigen.

4.4.2 Discrete-Choice-Analyse

Die *Discrete-Choice*-Analyse stellt eine vielfach angewendete Methodik zur Beschreibung von Konsumentenentscheidungen und Quantifizierung von Entscheidungsvariablen dar. Die Theorie geht auf Thurstones (1927) Konzept der psychologischen Stimuli aus der Disziplin der mathematischen Psychologie zurück sowie deren späteren Interpretation im Kontext der Nutzentheorie durch Marschak (1960), der die *Random-Utility-Modelle* einführte (Train 2003). Aus Sicht der Psychologie ist die Theorie motiviert durch die Beobachtung unterschiedlichen Verhaltens von Entscheidungsträgern bei wiederholt durchgeführten Entscheidungsexperimenten, während aus ökonometrischer Perspektive eine stochastische Formulierung von Nutzwerten mit der Existenz von Faktoren begründet wird, die dem Wissenschaftlicher verborgen bleiben (Dagsvik 1994).

Vor diesem Hintergrund wird der Verhaltensprozess des Konsumenten zwischen konkurrierenden – sich ausschließenden – Alternativen durch eine Funktion aus beobachteten Faktoren (x) und unbeobachteten Faktoren ε beschrieben. Da letzteres einer Zufallsvariable mit der Dichte $f(\varepsilon)$ entspricht, wird das Entscheidungsverhalten als stochastisch beschreiben. Die entsprechende Nutzwertfunktion eines Entscheidungsträgers für eine bestimmte Alternative lässt sich demensprechend folgendermaßen beschreiben (Train 2003).

$$U_{d,j} = V_{d,j}(x) + \epsilon_{d,j} \tag{10}$$

$V_{d,j}$ *Beobachtbarer Nutzwert der Alternative j für Entscheidungsträger d*

Die Art des *Discrete-Choice*-Modells wird durch die angenommene Wahrscheinlichkeitsverteilung für die nicht beobachtbaren Faktoren bestimmt. Die Wahl der Verteilung ist wiederum aus dem Design des Untersuchungsexperiments motiviert, wodurch bestimmte Anforderungen an die Eigenschaften der unbeobachteten Faktoren resultieren können. Das *multinominale Logit-Modell* zur Beschreibung von Wahlentscheidung bei mehr als zwei Alternativen unterstellt für $f(\varepsilon)$ eine *Gumble-Verteilung*[42]. Im ökonometrischen Sinne stellt V den Nutzwertanteil dar, der durch das empirische Modell erfasst wird. Dieses ist abhängig von den Attributen (x_i) der zur Wahl stehenden Alternativen (*j*), den Attributen des Entscheidungsträgers (d_i) und der Gewichtung eines Attributes bei der Wahlentscheidung (β_i). Wird eine lineare Nutzwertfunktion angenommen – was

[42] Die Verteilung wird auch als Typ-I-Extremwertverteilung bezeichnet.

in der Regel der Fall ist – resultiert die folgende *Logit*-Wahrscheinlichkeit, dass die Alternative *j* vom Entscheidungsträger gewählt wird[43].

$$\mathrm{P}_{d,j} = \frac{e^{\Sigma_i \beta_{di} \cdot x_{i,d,j}}}{\sum_{j=1}^{J} e^{\Sigma_j \beta_{d,i} \cdot x_{i,d,j}}} \qquad (11)$$

Hinsichtlich der Berücksichtigung von akteursspezifischen Investitionsentscheidungen stellt die *Discrete-Choice*-Analyse zum einen Methoden bereit, geeignete Verhaltensmodelle zur Simulation der Technologiewahl zu entwerfen. Zum anderen kann sie zur Bestimmung der Relevanz von Entscheidungsparametern und zur Segmentierung von Entscheidungsträgern gleicher Kalküle eingesetzt werden. Letztere können in einem *Logit*-Modell beispielsweise durch die Erweiterung um sozio-ökonomische Parameter erfasst werden. Um mit diesen entscheidungsträgerspezifischen Variablen, die per Definition unabhängig von den Alternativen sind, eine Differenzierung zwischen der Bewertung der Technologieoptionen zu erreichen, gibt es zwei Möglichkeiten (Train 2003). Die Nutzwertfunktion wird um die sozio-ökonomischen Parameter der jeweiligen Entscheidungsträger erweitert, gewichtet um Faktoren, die in Abhängigkeit der Wahlalternativen definiert werden. Auf diese Weise beeinflussen die sozio-ökonomischen Parameter direkt die Höhe der Nutzwerte unabhängig von den Attributen der Alternativen.

$$V_{d,j} = \sum_{i=1}^{I} \beta_{i,d} x_{i,j} + \sum_{k=1}^{K} \theta_{k,j} s_{k,d} \qquad (12)$$

$s_{k,d}$	*Sozio-ökonomisches Attribut k von Entscheidungsträger d*
$\theta_{k,j}$	*Gewichtung/Relevanz des soziökonomischen Parameters k hinsichtlich Technologiealternative j*

Die andere Möglichkeit besteht darin, die entscheidungsträgerspezifischen Variablen in den Attributen oder Skalaren einzubeziehen. Dieses Modelldesign ist geeignet, wenn davon auszugehen ist, dass bestimmte Parameter des Entscheidungsträgers die Relevanz eines bestimmten Attributes aller Technologieoptionen beeinflussen.

[43] Für die Herleitung der Formel sei auf Train (2003) verwiesen.

$$V_{d,j} = \sum_{i=1}^{I} \beta_{d,i}(s_d) \cdot x_{i,j} \qquad (13)$$

$$\beta_{d,Invest} = \rho_{Invest} / s_{d,Income}$$

Die Anwendung des *Logit*-Ansatzes weist einige Einschränkungen hinsichtlich der Einbeziehung von Alternativen und Attributen auf, die beim Modellentwurf berücksichtigt werden müssen[44]. Für das Design eines Verhaltensmodells zur Technologiewahl von Wärmeversorgungssystemen oder Energieeffizienzoptionen kann insbesondere die Anforderung der „Unabhängigkeit von irrelevanten Alternativen" (*Independence from irrelevant alternatives)* problematisch sein. Dieses Axiom ist relevant, wenn aufgrund eines hohen Grades an Disaggregation bei den untersuchten Alternativen ähnliche Technologien (z. B. Erdgas-Brennwert und Erdgas-Niedertemperatur) in der Wahlentscheidung vorliegen und diese in der Folge überproportional hohe Wahlwahrscheinlichkeiten zugeordnet bekommen (Kranzl et al. 2013). Eine Möglichkeit, dieses Axiom zu umgehen, stellt das sogenannte *Nested-Logit*-Modell dar (vgl. 5.5.3).

Zwei unterschiedliche Erhebungsmethoden werden im Rahmen der *Discrete-Choice*-Analyse angewendet, um geeignete Daten für die Untersuchung der Relevanz von Entscheidungsparametern und die Segmentierung von Entscheidungsträgern zu gewinnen: Die *Revealed-Preference*-Methode ermittelt Parametergewichtungen auf Basis von beobachtetem Verhalten, beispielsweise mittels historischen Marktanteilen oder durch Befragungen von Gebäudeeigentümern, welche kürzlich Energieeffizienzmaßnahmen durchgeführt haben. Die *Stated-preference*-Methode hingegen konfrontiert Konsumenten mit hypothetischen Wahlentscheidungen zwischen verschiedenen Alternativen, die durch ihre Attribute (Investitionen, Energieeinsparung, CO_2-Emissionen etc.) beschrieben werden. Der Vorteil dieser Methode liegt in der einfacheren Gewinnung der Daten durch eine Erhebung in dem für die Forschungsfrage zugeschnittenen Design. Demgegenüber ist der Vorteil der *Revealed-Preference*-Methode darin zu sehen, dass es sich um tatsächliche Entscheidungen unter Marktbedingungen handelt[45].

Tabelle 8 gibt einen Überblick zu den aus der Literatur bekannten Anwendungen der *Discrete-Choice*-Analyse im Bereich der Wärmeversorgung und der Effizienzmaßnahmen im Gebäudebereich.

---

[44] Eine detaillierte Diskussion der Anforderungen und Einschränkungen findet sich in (Chipman 1960; Debreu 1960; Train 2003).

[45] Für einen detaillierteren Vergleich beider Methoden sei auf Verhoef und Franses (2002) verwiesen.

Tabelle 8: Discrete-Choice-Fallstudien für den Bereich der Wärmeversorgung und der Energieeffizienz in Gebäuden

Choice Set	Entscheider	Attribute der Technologien	Attribute der Entscheider	Referenz/ Methode
Dezentrale Energieerzeugung: ▪ Gaskessel ▪ Biomassekessel ▪ Wärmepumpen ▪ Solarthermie ▪ PV/Kleinwind	Haushalte in UK 1241 Befragte	▪ Investitionen ▪ Energiekosten ▪ Betriebskosten ▪ Komfort ▪ Empfehlung vom Installateur	-	(Scarpa and Willis 2010) Stated preference
EE-Systeme ▪ Biomassekessel ▪ Solarthermie ▪ PV/Kleinwind	Eigentümer von Wohngebäuden 1012 Befragte	▪ Investitionen ▪ Nachhaltigkeit ▪ Brennstoffautonomie ▪ Erprobbarkeit ▪ Komplexität ▪ Risiko ▪ Subjektive Normen und Wissen	▪ Alter ▪ Geschlecht ▪ Bildung ▪ Einkommen ▪ HH-Größe ▪ Region ▪ Gebäudetyp	(Claudy et al. 2011) Stated Preference
Energieeffizienz ▪ Fenster ▪ Fassade ▪ Lüftungsanlage	Eigentümer von EFH, Mieter in MFH in der Schweiz 305 Befragte	▪ Effizienzlevel ▪ Investitionen (EFH) ▪ Zusätzliche Miete pro Monat (MFH)	▪ Eigentümer ▪ Mieter	(Banfi et al. 2008) Stated Preference
EE-Wärme-Systeme ▪ Biomassekessel ▪ Wärmepumpe ▪ Gas + Solarthermie ▪ Öl + Solarthermie	Empfänger von Zuschüssen durch das MAP 2985 Befragte	▪ Investitionen ▪ Erhaltener Zuschuss ▪ Energiekosten ▪ Energieeinsparungen ▪ Betriebskosten ▪ Brennstoffautonomie ▪ Komfort ▪ Image	▪ Alter ▪ Geschlecht ▪ Einkommen ▪ Bildung ▪ Region ▪ Gebäudeeigenschaften	(Michelsen and Madlener 2012) Revealed und Stated Preference
Wärmeversorgungssysteme ▪ Holzpelletkessel ▪ Scheitholzkessel ▪ Wärmepumpe ▪ Elektrische Heiz. ▪ Fernwärme	Eigentümer von Wohngebäuden in Finnland 521 Befragte	▪ Investitionen ▪ Betriebskosten ▪ CO_2 Emissionen ▪ Feinstaub-Emissionen ▪ Eigene Arbeit ▪ Vorheriges Wärmeversorgungssystem		(Rouvinen and Matero 2012)
Energieträger ▪ Gas ▪ Öl ▪ Strom ▪ Fernwärme ▪ Festbrennstoff ▪ Öl u. Festbrennstoff ▪ Gas u. Festbrennstoff	Haushalte in Deutschland Sozio-ökonomisches Panel von 12 000 Haushalten	▪ Gebäudetyp ▪ Alter der Wohnung ▪ Sanierung in den letzten 5 Jahren	▪ Eigentümer ▪ Mieter ▪ Eigentümergemeinschaften ▪ Einkommen ▪ Bildung ▪ Haushaltsgröße ▪ Region	(Braun 2010) Revealed preference
Hypothetische Wärmeversorgungssysteme und Sanierungsoptionen	Gebäudeeigentümer	▪ Investitionen ▪ Energiekosteneinsparung ▪ Amortisationszeit ▪ CO_2 Einsparungen ▪ Empfehlung vom Energieberater ▪ Förderung ▪ Garantien	▪ Alter ▪ Geschlecht ▪ Einkommen ▪ Bildung ▪ Region ▪ Gebäudeeigenschaften	(Achtnicht 2010) Stated preference

Quelle: Quellenangaben in Tabelle

4.4.3 Sozio-psychologische Modelle

Die Literatur zu Konsumentenverhalten mit Bezug zu ökologischen Produkten befasst sich zu einem großen Teil mit Modellen, die Technologiewahl als psychologischen Prozess basierend auf individuellen Vorstellungen, Gewohnheiten und Normen erklären. Die Theorien versuchen dabei, die Kritik an den Hauptannahmen der rationalen Entscheidungstheorie zu adressieren (Jackson 2005):

- Begrenzte Rationalität: Die Unsicherheit über die zukünftige Entwicklung und die Kosten der Informationsgewinnung stehen der Annahme gegenüber, dass ein Entscheidungsträger alle Kosten und Nutzenaspekte der zur Wahl stehenden Alternativen kalkuliert (Simon 1957)
- Soziale Dimension: Die Fokussierung der Analyse auf das Individuum vernachlässigt den Zusammenhang der technologischen Adaption als sozialen Prozess (Rogers 2003)
- Moralische Dimension: Die Annahme einer rein rational basierten Entscheidung berücksichtigt nur den individuellen Eigennutz als einzigen Treiber (Jackson 2005)

Einige komplexe Modelle sind rein theoretischer Art und zielen darauf ab, den psychologischen Prozess der Entscheidungsfindung detailliert dazustellen, um unterschiedliche Ansatzpunkte zur Änderung des Konsumentenverhaltens – z. B. für Politikinstrumente – zu liefern. Allerdings sind viele Modelle aufgrund der Komplexität auf eine konzeptionelle Anwendung beschränkt und erlauben keine empirische, quantitative Untersuchung der im Modell postulierten Einflussparameter und Interdependenzen. Die Mehrheit der empirisch angewendeten psychologischen Modelle zur Beschreibung ökologischen Verhaltens lässt sich entweder auf die „*Theory of Planned Behavior" (TPB)* oder die „*Value-Belief-Norm" (VBN)* Theorie zurückführen (Galarraga et al. 2011). Erstere geht weiterhin von einem Vergleich zwischen Alternativen aus (kognitiver Ansatz), während die *Value-Belief-Norm* Konsumentenentscheidung nur durch existierende Normen und Werte erklärt und damit als normativer Ansatz bezeichnet werden kann (Kaiser et al. 2005; Michelsen and Madlener 2010). Während die *VBN* ein erklärendes Modell für ökologisches Verhalten darstellt, liefert die *TPB* einen mathematisch operationalisierbaren Ansatz, der sich auch auf die Untersuchung von Investitionsentscheidungen vergleichbarer sich ausschließender Alternativen anwenden lässt. Im Folgenden wird daher *TPB* und deren Anwendung als theoretische Rahmen zur

Beschreibung akteursspezifischer Investitionsentscheidungen in Wärmeversorgungssysteme und Energieeffizienzmaßnahmen diskutiert[46].

Die durch Ajzen (1991) basierende, auf der *„Theory of reasoned action"* (Fishbein and Ajzen 1975) entwickelte Theorie stellt eines der meistangewendeten psychologischen Modelle zur empirischen Untersuchung ökologischen Verhaltens dar (Jackson 2005). *TPB* formuliert die Intention eines Individuums hinsichtlich einer bestimmten Handlung als Maß für die Wahrscheinlichkeit, diese auch durchzuführen. Mit Bezug auf die Wahl eines Wärmeversorgungsystems wäre somit die Intention bezüglich einer Alternative als Wahrscheinlichkeit zu interpretieren, dass die Alternative gewählt wird. Intentionen werden dabei durch drei unabhängige Terme operationalisiert: Haltung gegenüber einer bestimmten Handlung/Verhalten (*Attitudes),* subjektive (gesellschaftliche) Normen (*Subjective Norms)* und wahrgenommene Kontrolle über die Handlung.

Attitudes können als Summe der Vorstellungen eines Entscheidungsträgers ($b_{i,d,j}$) über die Attribute einer Wahlentscheidung beschrieben werden, gewichtet mit der individuellen Bewertung der Wichtigkeit dieser Attribute ($e_{i,d,j}$) (vgl. Formel (14)). Die mathematische Formulierung dieses Terms unterscheidet sich damit nicht wesentlich von der präferenzorientierten Entscheidungstheorie, auf welche die *Discrete-Choice-Analyse* zurückgeht. Wenn beispielweise ein Entscheidungsträger die Verringerungen der Abhängigkeit von fossilen Brennstoffen als etwas Positives wahrnimmt, ist es wahrscheinlich, dass dieser gegenüber einem EE-Wärmeversorgungssystem eine positive Haltung einnimmt (Michelsen and Madlener 2010). Die Wahrscheinlichkeit, dass dieser Entscheidungsträger ein solches System installiert ist somit höher, als wenn die Unabhängigkeit von fossilen Brennstoffen nicht als etwas Anzustrebendes bewertet wird.

Subjektive Norms repräsentieren soziale Faktoren, welche den Einfluss von relevanten anderen Akteuren oder den wahrgenommenen sozialen Druck auf den jeweiligen Entscheidungsträger abbilden. Diese werden wie *Attitudes* als lineare Gleichung formuliert, die die normativen Vorstellungen relevanter Akteure gegenüber einer Entscheidungsalternative ($n_{s,j}$) und die Motivation des Entscheidungsträgers dieser Empfehlung zu folgen ($m_{s,d}$) erfasst. Damit kann der entscheidende Einfluss operationalisiert werden, den beispielsweise Installateure, Energieberater oder Architekten oder auch Freunde und Nachbarn bei der Investitionsentscheidung in Wärmeversorgung und Energieeffizienzmaßnahmen haben.

---

[46] Für eine Beschreibung der *Value-Belief-Norm*-Theorie sei auf Stern et al. (1999) verwiesen.

Der dritte Term – *Perceived behavioral Control* – erfasst externe Faktoren wie die Verfügbarkeit bestimmter Ressourcen oder Fähigkeiten des Entscheidungsträgers. Diese wird operationalisiert durch die Summe der Vorstellungen über den fördernden oder hemmenden Einfluss externer Faktoren ($p_{k,d}$) multipliziert mit der wahrgenommenen Kontrolle oder Verfügbarkeit ($c_{k,d}$) über diese Faktoren. Externe Faktoren beeinflussen die Investitionsentscheidung zweifach. Einerseits kann die Menge der zur Verfügung stehenden Technologiealternativen infrastrukturell oder durch Vorschriften (Politiken) absolut eingeschränkt sein. Anderseits können, trotz positiver Bewertung hinsichtlich *Attitudes* und *Subjective Norms,* fehlende finanzielle Ressourcen zu einer Ablehnung einer Alternative führen (Michelsen and Madlener 2010).

TPB unterstellt einen linearen Zusammenhang zwischen den drei Termen und der Intention, eine Handlung durchzuführen.

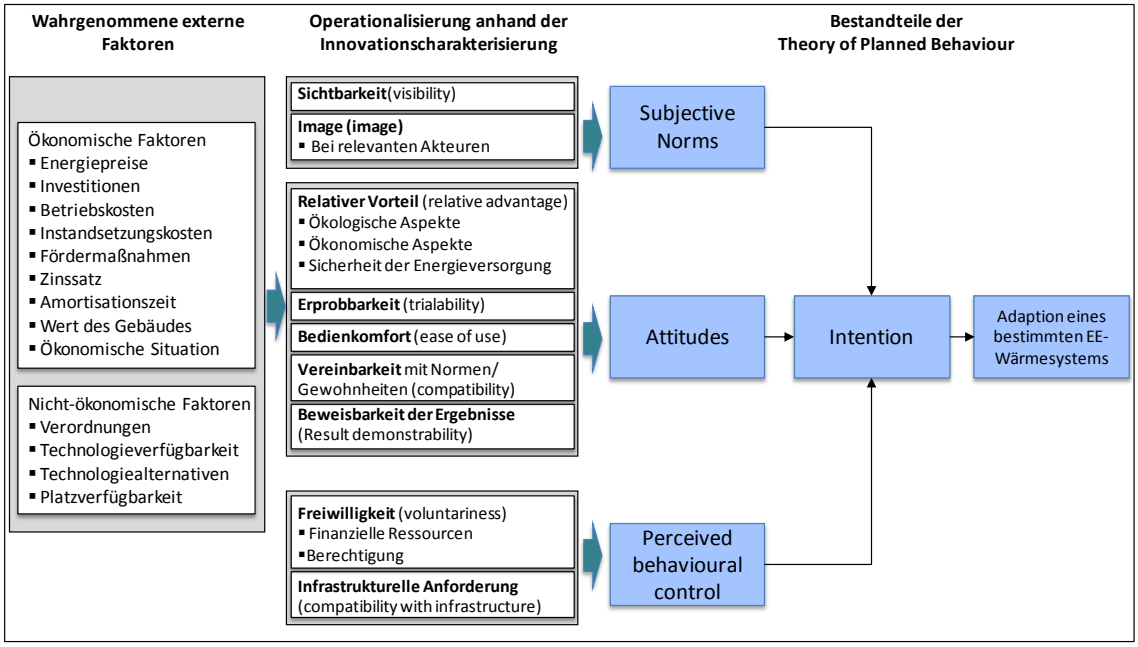
$$B_{nj} \approx I_{nj} = w_1 \cdot \underbrace{\sum_{i=i}^{I} b_{i,d,j} \cdot e_{d,j}}_{Attitudes} + w_2 \cdot \underbrace{\sum_{s=1}^{S} n_{sj} \cdot m_{s,d}}_{\substack{Subjective \\ Norms}} + w_2 \cdot \underbrace{\sum_{k=1}^{K} p_{k,d} \cdot c_{k,d}}_{\substack{Perceived \\ behavioural \\ control}} \qquad (14)$$

Empirische Studien sind in der Regel auf die Parameterschätzung der Abhängigkeiten zwischen *Attitudes, Subjective Norms, Perceived Behavioral Control* und *Intentions* fokussiert und nicht auf die Vorhersage realen Verhaltens (Jackson 2005). Um diese Einflüsse empirisch zu messen, werden die Bestandteile in einem Fragebogen in Form von Aussagen codiert, die durch den Befragten auf einer *Likert-Skala* hinsichtlich der persönlichen Zustimmung bewertet werden. *TPB* und andere psychologische Verhaltensmodelle können jedoch auch als konzeptionelles Modell zur Grundlage für ein Simulationsmodell des Investitionsentscheidungsverhaltens dienen. Ein theoretisches Modell zur Beschreibung des Investitionsverhaltens von privaten Wohngebäudeeigentümern auf Basis der *TPB* wird von Michelsen und Madlener (2010) vorgeschlagen (Abbildung 21). *Attitudes, Subjective Norms* und *Perceived Behavioral Control* werden dabei durch das Konzept der wahrgenommenen Eigenschaften von Innovationen[47] (Moore and Benbasat 1996) operationalisiert, welches eine Erweiterung des Konzepts der „*Attributes of Innovation*“ von Rogers (2003) darstellt.

Eine Möglichkeit, psychologische Verhaltenstheorien als Simulationsmodellen zu implementieren stellt die *agentenbasierte Modellierung* dar (vgl. 4.4.5).

---

[47] Perceived Characteristics of Innovation scale (Moore und Benbasat 1996)



Quelle: Eigene Darstellung auf Basis von (Michelsen and Madlener 2010)

Abbildung 21: Theoretisches Modell von Michelsen und Madlener (2010) zur Beschreibung der Investitionsentscheidung von Wärmeversorgungssystemen basierend auf der *Theory of Planned Behavior*

4.4.4 Heuristische Entscheidungsfindung

Sowohl die *Discrete-Choice-Analyse,* als auch die *Theory of Planned Behavior* postulieren, dass die Investitionsentscheidung auf einem Vergleich aller Alternativen aus Sicht des jeweiligen Entscheidungsträgers basiert. Andere verhaltensanalytische Ansätze hinterfragen diese implizite Annahme der Rationalität und beschreiben den Entscheidungsprozess als eine Reihe unterschiedlicher Regeln bzw. Heuristiken, die in Abhängigkeit der Entscheidungssituation und des Informationsgrades angewendet werden (Gigerenzer 1999; Simon 1957; Wilson and Dowlatabadi 2007). Modelle der beschränkten Rationalität und der heuristischen Entscheidungsfindung beschreiben einfache Entscheidungsregeln sowie einfache Regeln der Informationsgewinnung (Gigerenzer and Selten 2001). Der Vergleich zwischen den Alternativen anhand der relativen Vorteilhaftigkeit, wie es in der Entscheidungstheorie postuliert ist, stellt eine eher komplexere Entscheidungsregel dar, die auch als Deliberationsstrategie (Jager 2000) oder *WAAD*-Regel[48] bezeichnet werden kann. Empirische Untersuchungen zeigen jedoch, dass in vielen Entscheidungssituationen einfache Regeln angewendet

[48] Weighted Additive Rule

werden. Eine für die Investitionsentscheidung relevante Entscheidungsstrategie stellt beispielsweise die „Rekognitionsheuristik“ dar, welche bekannte Alternativen oder Elemente bevorzugt (Goldstein and Gigerenzer 1999). Hinsichtlich der Investitionsentscheidung bei der Wärmeversorgung zeigt sich dies beispielweise in der wiederholten Wahl des existierenden Wärmeversorgungssystems. „Elimination nach Aspekten“ sowie die „lexikographische Heuristik“ reduzieren die Komplexität bei der Entscheidungsfindung durch die Fokussierung auf das – aus Sicht des Entscheidungsträgers – wichtigste Attribut. Eine weitere Heuristik stellt die „Imitation der Mehrheit“ dar, in der die Alternative gewählt wird, die auch von der Mehrheit der Leute in der eigenen Peergroup gewählt wird (Gigerenzer 2008). Diese Art der Heuristiken wird durch Gigerenzer und Todd (1999) unter dem Begriff der „schnellen und einfachen Entscheidungsfindung“[49] zusammengefasst, die den Bestandteil der „adaptiven Werkzeugkiste“ eines jeden Menschen bilden. Ein Entscheidungsträger bedient sich je nach Situation bewusst oder unbewusst einer dieser Strategien.

4.4.5 Agentenbasierte Modellierung

Agentenbasierte Modellierung[50]stellt eine Möglichkeit dar, theoretische Modelle der individuellen Investitionsentscheidung und deren empirische Ergebnisse in einer Simulationsumgebung umzusetzen. Der Begriff umfasst Techniken mit denen die Handlungen autonom agierender Individuen oder Wirtschaftssubjekten in einem Computermodell simuliert werden können. Anwendungen dieser Methodik in der Energiesystemmodellierung des Stromsektors finden sich beispielsweise in Genoese (2010) und Held (2010). *Agentenbasierte Modellierung* ist methodisch auf drei Programmierparadigmen zurückzuführen (Epstein and Axtell 1996; Ferber 1999; Hare and Deadman 2004):

1) Die *Individuen-basierte Modellierung (IBM)*[51] wurde ursprünglich zur Simulation von Ökosystemen entwickelt und postuliert die diskrete Abbildung von Individuen unterschiedlicher Eigenschaften sowie die räumliche Auflösung (Huston et al. 1988)
2) Die Simulation künstlichen Lebens zielt auf die Modellierung von Systemen auf einer Makroebene, indem Verhalten auf der Mikroebene explizit berücksichtigt wird
3) Multiagenten-Systeme (MAS) setzen sich aus Agenten zusammen, die in einer Systemumgebung platziert sind und die Fähigkeit haben, autonome Handlun-

---

49 Fast and frugal heuristics

50 Im Englischen als *agent based modeling* bezeichnet

51 Individual based modeling

gen in dieser Umgebung durchzuführen, um ihre definierten Zielvorgaben zu erreichen (Wooldridge and Jennings 1995:5). Um autonome Handlungen flexibel durchführen zu können, muss der Agent in einem Computermodell mit folgenden Eigenschaften implementiert werden (Wooldridge 2013):

- Wahrnehmung der Systemumgebung und die Fähigkeit, auf Änderungen zu reagieren (*reactivity)*
- Durchführung von zielorientiertem Verhalten (*pro-activity)*
- Fähigkeit, mit anderen Agenten zu interagieren (s*ocial ability)*

In Abhängigkeit der Forschungsdisziplin werden *agentenbasierte* Modelle einer der drei dargestellten Kategorien zugeschrieben. Hare und Deadman (2004) unterscheiden die Modellansätze anhand des Interaktionsgrades zwischen den Agenten. *Individuenbasierte Modellierung* ist auf die Abbildung der Heterogenität der Individuen fokussiert mit einfachen Interaktionen, während Multi-Agenten-Simulation mehr Gewicht auf die Interaktion zwischen Agenten legt (Bousquet and Page 2004).

Vor diesem theoretischen Hintergrund werden im Folgenden die aus der Literatur bekannten a*gentenbasierten* Modelle zur Simulation von Technologiewahl im Gebäudebereich diskutiert

Agentenbasierte Modelle im Gebäudebereich

Natarajan et al. (2011) schlagen eine Erweiterung des *DeCarb*-Modells vor, welches in der ursprünglich Version (Natarajan and Levermore 2007) als *Bilanzierungsmodell* mit bauphysikalischem Ansatz einzuordnen ist (vgl. 4.3). Das resultierende *De-Carb-ABM*-Modell definiert Agenten, mit denen jeweils 200 Haushalte aus Großbritannien repräsentiert werden. Die technischen und bauphysikalischen Eigenschaften von sechs unterschiedlichen Referenzwohnungstypen sind Teil eines jeden Haushalts-Agenten und werden bei der Erzeugung der Agenten im Modell zufällig zugewiesen. Die Agenten werden auf einem Raumgitter verteilt, welches reale geographische Koordinaten von Großbritannien abbildet. Die Sinnhaftigkeit der räumlichen Verteilung ist jedoch fragwürdig, da das Modell keine sozialen Strukturen oder irgendeine Art von Interaktionen zwischen Nachbarn in den dargestellten Szenarien einbezieht. Die zufällige Verteilung ist daher insofern gerechtfertigt, da die geographische Position ohnehin keinen Einfluss auf die Ergebnisse hat. Allerdings werden in dem Paper auch einige Resultate des Modells hinsichtlich des Einflusses der Autonomie der Agenten diskutiert. Dafür wird ein theoretisches Verhaltensmodell des agentenspezifischen Adaptionsverhaltens von Doppelglasfenstern hinterlegt. Die Adaption hängt dabei vom Einkommen des Haushalts, der Installation durch den Nachbarn sowie der Förderbedingungen ab. Die Interaktion zwischen den Agenten – Installation durch Nachbarn – wird dabei in Form einer

Entscheidungsvariablen abgebildet, welche die lokalen Marktanteile repräsentiert. Die eigentlichen Untersuchungsszenarien, welche versuchen, die ursprünglichen Ergebnisse des *DeCarb*-Modells zu reproduzieren, berücksichtigen hingegen weder Heterogenität im Entscheidungsprozess noch Interaktionen zwischen den Agenten. Der Mehrwert der räumlichen Auflösung und der Implementierung von Haushalts-Agenten, welche anstelle individueller Ziele und Wahrnehmungen technische Attribute der Wohnungen aufweisen, ist daher für die dargestellte Untersuchung fraglich.

Wittmann (2008) schlägt einen agentenbasierten Ansatz zur Modellierung von Investitionsentscheidungen im Bereich der städtischen Energieversorgung vor. Das Modell erfasst dabei sowohl private als auch kommerzielle Akteure. Private Akteure repräsentierten Gebäudeeigentümer, deren Investitionsentscheidungen über ein Verhaltensmodell simuliert werden, welches auf beschränkter Rationalität und Entscheidungsheuristiken basiert. Die Agenten werden unterschieden anhand der Art der Informationsgewinnung – Suchregeln, Suchbereich, ihrer Ziele sowie der angewendeten Entscheidungsstrategie und Metrik, um die Ziele zu messen (Tabelle 9). Der Entwurf des Verhaltensmodell basiert dabei auf der Zielgruppen-Typologie des *SINUS-Instituts* (vgl. 2.3.2) sowie der Klassifikation der Rationalitätstypen (Gigerenzer and Selten 2001; Gigerenzer 1999). Kommerzielle Akteure sind Energieversorgungsunternehmen, die Energiedienstleistungen anbieten und bestimmte Technologien bewerben. Außerdem betreiben diese Heiz- und Kraftwerke sowie Gas- und Wärmenetze. Die Agenten können im Modell verschiedene Strategien zur Allokation des Kapitals auf unterschiedliche Investitionsoptionen wählen. Des Weiteren können die kommerziellen Akteure anhand ihrer Erwartungen über die Energiegroßhandelspreise unterschieden werden. Allerdings werden nur sogenannte nicht-strukturelle Entscheidungen endogen modelliert. Dies umfasst die Entscheidung, eine bestimmte Technologie beim Endkunden zu bewerben oder finanziell zu fördern, die Änderung der Energiepreise sowie die Entscheidung, ob spezielle Mikro-KWK-Kontrakte angeboten werden. Investitionen in zentrale Erzeugungskapazität oder der Ausbau von Infrastruktur (z. B. Wärmenetze) werden exogen festgelegt. Die Interaktion zwischen privaten und kommerziellen Agenten ist im Modell daher nur über die Änderung der Energiepreise und der Änderung des Suchbereichs der Gebäudeeigentümer, falls eine bestimmte Technologie beworben wird, realisiert. Eine Rückkopplung der privaten zu den kommerziellen Akteuren, z. B. in Form erfolgreich abgeschlossener Kontrakte, ist nicht implementiert. In Wittmann (2008) wird eine exemplarische Anwendung des Modells gezeigt. Eine Anwendung auf ein reales System, beispielsweise mit Daten zu Allokation unterschiedlicher Gebäudeeigentümer und Energieversorgungsunternehmen in einer bestimmten Stadt, wurde nicht durchgeführt.

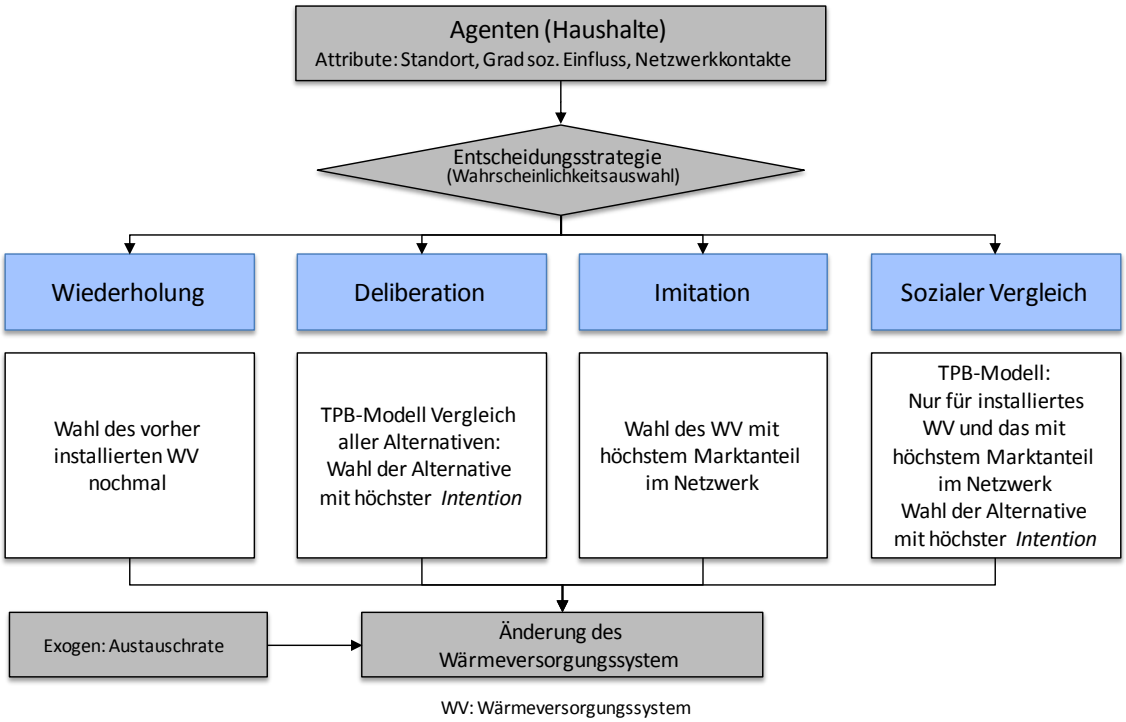
Tabelle 9: Parameter des Entscheidungsmodells für private Akteure im *agentenbasierten* Modell von Wittmann (2008)

Suchregel	*Suchbereich*	*Entscheidungs-strategie*	*Ziele*	*Zielmetrik*
Finde alle Alternativen	Peergroup	Zielreihenfolge	Kosten	Investitionen Betriebskosten Amortisation Kapitalwert
Finde alle Alternativen, welche bestimmte Bedingungen erfüllen	Gesellschaft	Zufriedenheit: Erfüllung eines definierten Anspruchsniveaus für jedes Ziel	Umwelt	Qualitativ Energiebedarf THG-Emissionen
Finde die häufigen Alternativen im definierten Suchbereich	Standort	Lexikographisch: Setze relative Wichtigkeit für die verschiedenen Ziele	Komfort	Qualitativ
	Thematisch: Neue Technologien	Gewichtete Nutzwertbestimmung auf Basis der Ziele		

Quelle: Eigene Darstellung auf Basis von (Wittmann 2008)

Sopha (2011) schlägt einen *agentenbasierten* Ansatz zur Analyse der Diffusion von Holzpellet-Kesseln in Norwegen vor. Agenten repräsentieren die einzelnen Haushalte in Norwegen, welche mittels einer empirischen Studie parametrisiert wurden. Die Agenten werden in einer Systemumgebung entsprechend ihrer realen geographischen Koordinaten räumlich verteilt. Wärmeversorgungssysteme werden durch unterschiedliche ökonomische und nicht-ökonomische Attribute beschrieben. Die Haushalts-Agenten unterscheiden sich anhand ihrer Entscheidungsstrategien, dem Grad des sozialen Einflusses, des Haushaltstyps und des Standorts. Im Modell werden vier unterschiedliche Entscheidungsstrategien berücksichtigt, welche auf die Kategorisierung unterschiedlicher Verhaltenstheorien nach Jager (2000) zurückgehen (Abbildung 22). Die Strategien werden zufällig mit Wahrscheinlichkeiten ausgewählt, welche über eine empirische Studie ermittelt wurden (vgl. Sopha and Klöckner 2011). Die *Deliberation*-Strategie bewertet alle Optionen mittels eines psychologisches Modells auf Basis der *TPB* (vgl. 4.4.3). Dabei wird das Wärmeversorgungssystem mit der höchsten *Intention* ausgewählt. Das *TPB*-Modell wird um einen Term der persönlichen Norm erweitert, der

die moralische Verpflichtung zur Nutzung eines umweltfreundlichen Wärmeversorgungsystems operationalisiert. *Subjective Norms* wird operationalisiert durch die Anzahl der mit dem jeweiligen Haushalt agierenden Agenten, welche das infrage kommende Wärmeversorgungssystem nutzen, und dem Grad des sozialen Einflusses des jeweiligen Haushalts. Die Interaktion der Haushalts-Agenten ist durch ein *Small-World-Netzwerk* realisiert.



Quelle: Eigene Darstellung auf Basis von (Sopha et al. 2011)

Abbildung 22: Simulation der Technologiewahl im *agentenbasierten* Modell von Sopha (2011)

4.5 Auswahl eines Modellansatzes für die weitere Analyse

Der methodische Überblick zu den Modellierungsansätzen für den Gebäudebereich zeigt zunächst, wie in der Synthese (vgl. 4.3.3) dargestellt, dass für die in dieser Arbeit untersuchte Forschungsfrage ein *Bottom-up*-Simulationsmodell einen geeigneten Ansatz darstellt. Die bestehenden Modelle, die eine Analyse des Gebäudebereichs auf nationaler Ebene ermöglichen, weisen dabei eine hohe Genauigkeit und Auflösung hinsichtlich der technischen und ökonomischen Parameter auf, während der Entscheidungsprozess als Treiber der technologischen Adaption nicht in gleicher Weise detailliert abgebildet wird. Die Technologiewahl ist in den Modellen in Form einer aggregierten Verteilungsfunktion aus rationaler Perspektive implementiert. Empirische Untersu-

chungen zur Präferenzmessung zeigen jedoch, dass die ökonomische definierte Wirtschaftlichkeit nur einen Teil der Entscheidungsfindung darstellen kann und dass unterschiedliche Attribute der Wahlalternativen Relevanz besitzen. Sozio-psychologische Ansätze zum Konsumentenverhalten betonen die Relevanz individueller Wahrnehmung sowie von Werten und Normen und hinterfragen den Rationalitätsansatz eines allwissenden Kosten-Nutzen vergleichenden Akteurs. Die *agentenbasierte* Modellierung stellt eine geeignete Methode dar, Verhaltensmodelle in einer Simulationsumgebung umzusetzen. Existierende *agentenbasierte* Modellansätze zur Technologiewahl im Gebäudebereich versuchen, in unterschiedlicher Komplexität individuelles Entscheidungsverhalten und die Interaktionen zwischen Akteuren darzustellen. Der Fokus liegt jedoch dabei in der Simulation der Technologiewahl ohne die detaillierte Abbildung des gesamten Gebäudebereichs als Energiesystem.

Für die weitere Untersuchung in dieser Arbeit wird daher ein kombinierter Modellansatz gewählt, der ein technoökonomisches *Bottom-up*-Energiesystemmodell mit einer a*gentenbasierten* Simulation verbindet.

5 Modellierung der Wärmenachfrage im Gebäudebereich unter Berücksichtigung von individuellem Entscheidungsverhalten

5.1 Einführung

Wie in den vorangegangen Kapitel gezeigt, ist für die Untersuchung der Wirkung von Politikinstrumenten auf die zukünftige Entwicklung von EE-Wärme und des Energiebedarfs eine integrierte Betrachtung der Energienachfrage in Gebäuden, der eingesetzten Technologien sowie der Investoren erforderlich. Dieses Kapitel beschreibt das energiewirtschaftliche Modell, welches für die anschließenden Analysen eingesetzt wird.

5.2 Modellüberblick

Das in dieser Arbeit entwickelte Modell baut auf dem *Bottom-up*-Energiesystemmodell *Invert*/*EE-Lab* auf (Kranzl et al. 2013; Müller 2012; Müller et al. 2010; Stadler et al. 2007). *Invert/EE-Lab* ist ein einem bauphysikalischen Ansatz folgendes Simulationsmodell, welches den Gebäudesektor hinsichtlich des Raumwärme-, Warmwasser- und Klimatisierungsbedarfs sowie der eingesetzten Technologien abbildet. Der Gebäudebestand wird über Referenzgebäude und Referenzwärmeversorgungssysteme abgebildet, die über technologische und bauphysikalische Eingangsdaten definiert werden (Abbildung 23).

Ein Simulationszeitschritt entspricht im Modell einem Jahr, für das jeweils der Energiebedarf, der Anteil der Gebäude mit Sanierungsmaßnahmen oder mit dem Tausch des Wärmeversorgungssystems ermittelt wird. Darauf aufbauend wird die Wahl der zur Verfügung stehenden Technologien simuliert. Dieser zentrale Simulationsalgorithmus wird im Rahmen dieser Arbeit ersetzt und um ein agentenbasiertes Investitionsentscheidungsmodell weiterentwickelt, welches ebenso wie das Ausgangsmodell in der Programmiersprache *Python* programmiert ist. Neben der Integration von investorenspezifischem Entscheidungsverhalten liegt der Fokus auf der Abbildung unterschiedlicher Politikinstrumente zur Förderung von Energieeffizienz und erneuerbaren Energien im Wärmebereich. Es wird ein Modell zur Abbildung von Investoren und deren individuellen Entscheidungskalküle und Hemmnissen entwickelt und zur Anwendung auf Deutschland mit Eingangsdaten für das Jahr 2008 anhand der Energiebilanz kalibriert. In Abschnitt 5.7 erfolgt die Validierung des Modells anhand eines Vergleichs mit den historischen Entwicklungen für die Jahre 2009 bis 2011. In Kapitel 6 wird das Modell zur Analyse der Wirkung unterschiedlicher Politikinstrumente in Deutschland angewendet, indem Szenarienberechnungen bis zum Jahr 2020 durchgeführt werden.

Bevor die methodischen Weiterentwicklungen dargestellt werden, werden zunächst die verwendeten Module von *Invert/EE-Lab* kurz eingeführt. Abbildung 23 zeigt einen Modellüberblick vor den in dieser Arbeit vorgenommen Erweiterungen.

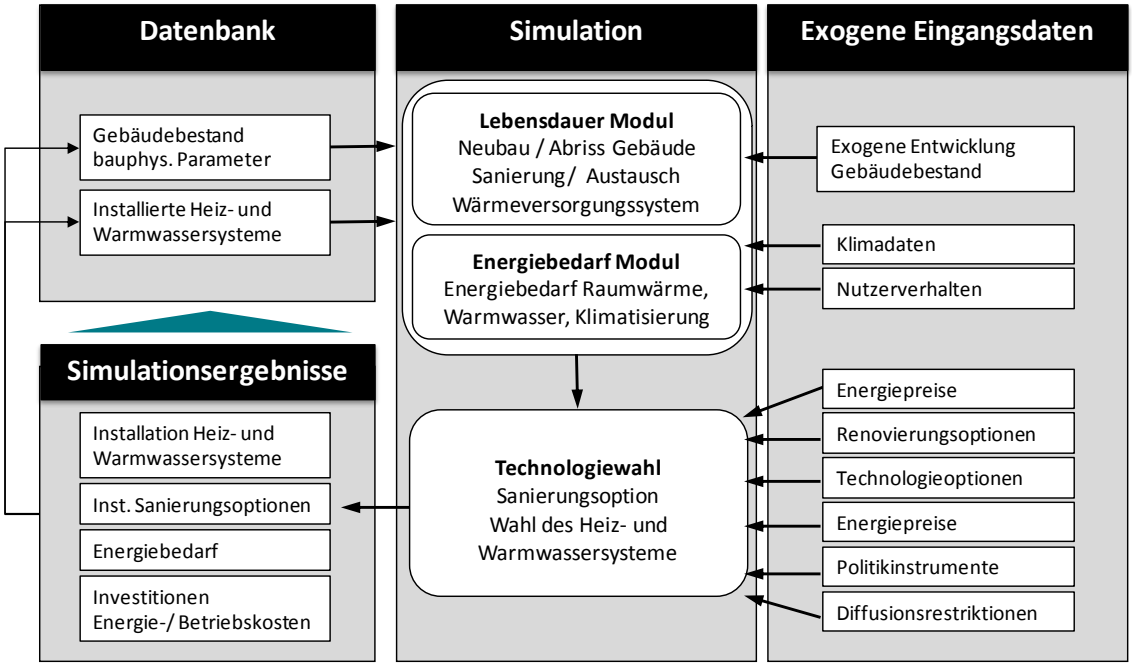
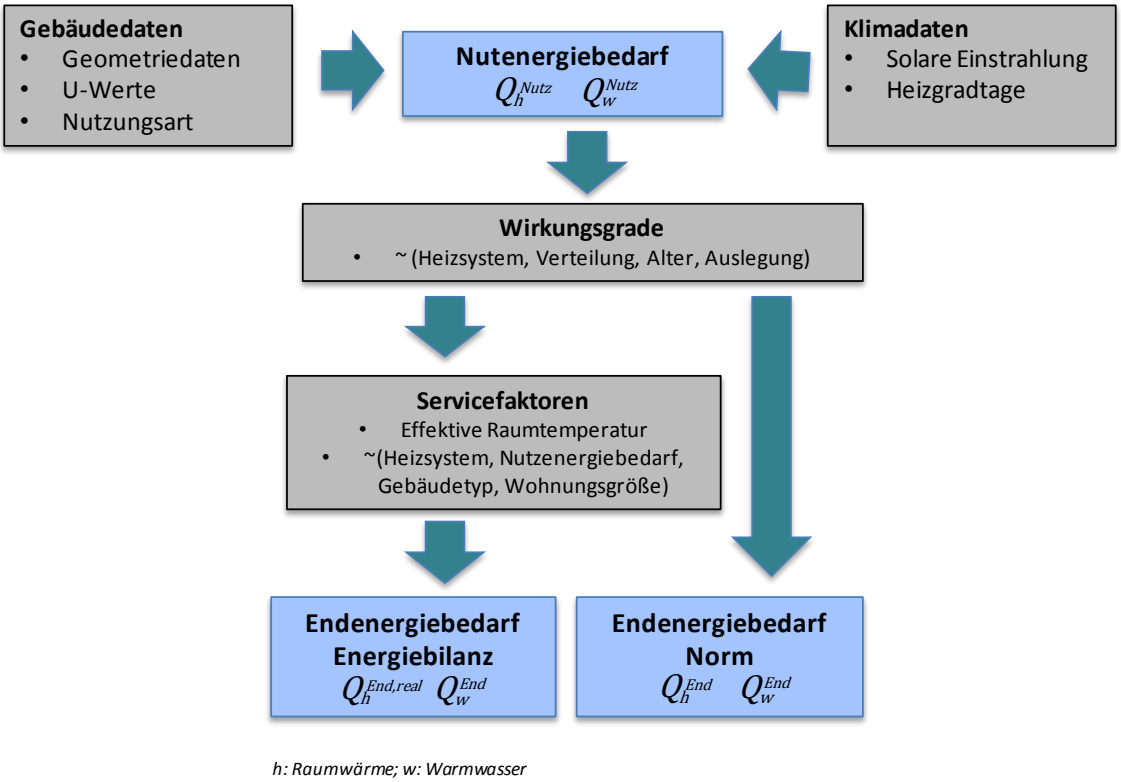


Abbildung 23. Schematische Darstellung des Modells INVERT/EE-Lab

5.3 Energiebedarfsmodul; Berechnung des Raumwärme- und Warmwasserbedarfs

Der Algorithmus zur Berechnung des Energiebedarfs für Raumwärme und Warmwasser wird schematisch in Abbildung 24 dargestellt. Für jedes Referenzgebäude wird der Nutz- und Energiebedarf entsprechend den für die Berechnung des Energieausweises relevanten Normen ermittelt[52]. Der Normendenergiebedarf entspricht einem theoretisch ermittelten Bedarfswert, welcher in der Regel von dem gemessenen Endenergiebedarf abweicht, da die reale Beheizung eines Gebäudes auch von den Einflüssen der Nutzer abhängt (Loga 1999). Diese Einflüsse werden im Modell durch für das jeweilige Gebäude- und Wärmeversorgungssystem spezifische Servicefaktoren berücksichtigt (vgl. 5.3.2). Der aggregierte Endenergiebedarf über alle Referenzgebäude soll damit mit dem durch die nationale Energiebilanz ausgewiesenen Endenergiebedarf für Raumwärme und Warmwasser vergleichbar sein (vgl. 5.6.7).

[52] DIN V 18599 2011; DIN V 4108-6 2003; DIN V 4701-10 2003; Pech et al. 2004



Quelle: Eigene Darstellung basierend auf (Müller et al. 2010)

Abbildung 24: Darstellung der Energiebedarfsberechnung

5.3.1 Berechnung des Nutz- und Endenergiebedarfs

Der Nutzwärmebedarf wird auf Basis eines Monatsbilanzverfahrens berechnet, in dem die Referenzgebäude in einem Ein-Zonenmodell abgebildet sind. Der jährliche Nutzenergiebedarf für Raumwärme wird aus der Summe der monatlichen Wärmesenken – Transmissionswärmeverluste und Lüftungsverluste – abzüglich der internen Wärmegewinne und der solaren Einstrahlung durch transparente Bauteile ermittelt (vgl. DIN V 18599-2 2011). Für die Modellberechnung ist die Definition der bauphysikalischen Parameter für jedes Referenzgebäude nötig. Der Zusammenhang zwischen dem ermittelten Nutzwärmebedarf und den gebäudespezifischen Eingangsdaten wird in den folgenden Formeln dargestellt.

$$Q_{h,bu}^{Nutz} = \sum_{M} Q_{M,bu}^{l} - Q_{M,bu}^{g} \cdot \eta_{M}^{g}(C_{bu}^{wirk}, Q_{M,bu}^{L}, Q_{M,bu}^{g}) \geq 0 \quad (15)$$

$$Q_{l,M,bu} = \Big(\underbrace{H_{T,M,bu}(A_{i,bu}, U_{i,bu})}_{\text{Transmissionsverluste [W/(m}^2\text{K)}} + \underbrace{H_{V,M,bu}(A_{i,bu}, V_{bu}, n_{L,p}, RLT_{bu})}_{\text{Lüftungsverluste [W/(m}^2\text{K)}}\Big) \frac{\Delta\theta_M \cdot d_M \cdot 24}{1000} \quad (16)$$

$$Q_{g,M,bu} = \underbrace{\Phi_{bu,M}^{\text{int}}(q_{h,p}^{int} \cdot V_{bu} \cdot d_M)}_{\text{Interne Gewinne}} + \underbrace{\Phi_{\text{bu,M}}^{\text{sol}}(I_{s,j,M}, A_{w,bu})}_{\text{Solare Einstrahlung}} \quad (17)$$

$Q_{h,bu}^{Nutz}$	*Nutzenergie für Raumwärme pro Jahr in Gebäude bu*
$Q_{l,M,bu}$	*Wärmesenken (Verluste) in bu in Monat M*
$Q_{g,M,bu}$	*Wärmequellen (Gewinne) in bu in Monat M*
η_M	*Ausnutzungsgrad der Wärmegewinne* $\sim Q_{g,M,bu}$ / $Q_{l,M,bu}$
V_{bu}	*Nettovolumen von bu*
$A_{i,bu}$	*Fläche von Bauteil i in bu*
$U_{i,bu,}$	*Wärmedurchgangskoeffizient von Gewerk i in bu*
$n_{L,p}$	*Luftwechselrate in Abhängigkeit von Nutzungsprofil p*
RLT_{bu}	*Lüftungsart in bu: freie Lüftung, mechanische Lüftung, Kombination*
$q_{h,p}^{int}$	*Interne Wärmequellen für Raumwärme bei Nutzungsprofil p*
$\Delta\theta_M$	*Differenz zwischen der Norm-Sollinnentemperatur und dem Monatsdurchschnitt der Außentemperatur*
$I_{s,j,M}$	*Solare Einstrahlung in Abhängigkeit der Himmelsrichtung j*
d_M	*Tage im Monat*

Zu den erforderlichen bauphysikalischen Inputparametern zählen die Geometrie und Fläche der Referenzgebäude, die Wärmedurchgangskoeffizienten der Bauteile sowie nutzungsartspezifische Parameter, wie der Wärmeeintrag durch innere Wärmequellen. Des Weiteren sind klimaabhängige Variablen wie Außentemperatur und solare Einstrahlung zu definieren (vgl. 5.6.6).

Der Nutzenergiebedarf der Warmwasserbereitstellung wird in Abhängigkeit der Nutzungsarten der Referenzgebäude bzw. des zu definierenden Warmwasserverbrauchs

ermittelt. Die unterschiedlichen Nutzungsarten[53] sind ebenso nicht fest vorgegeben, sondern werden als Eingangsdaten definiert.

$$Q_{w,bu}^{Nutz} = \sum_{M} q_{w,p} \cdot A_{N,bu} \cdot d_M \qquad (18)$$

$q_{w,p}$	*Spezifischer Warmwasserbedarf des Nutzungsprofils p [kWh/(m²d)]*
A_N	*Nutzfläche des Referenzgebäudes bu*

Der Endenergiebedarf jedes Referenzgebäudes wird auf Grundlage des Wärmenutzenergiebedarfs[54], der installierten Wärmeerzeuger und des Wärmeverteilungssystems berechnet. Das Modell berechnet den zusätzlichen zur Nutzenergie anfallenden Energiebedarf auf den Ebenen Erzeugung, Übergabe und Verteilung unter Berücksichtigung der entsprechenden Nutzungsgrade. Die indirekten Wärmeeinträge durch die Warmwasserverteilung werden in Abhängigkeit des jeweiligen Erzeugungs- und Verteilungssystems berücksichtigt.

$$Q_{w,bu}^{End} = \frac{Q_{w,bu}^{Nutz}}{\eta_{w,tot}\left(\eta_{w,tech}, \eta_{dist,bu}\right)} \qquad (19)$$

$$Q_{bu}^{End} = \frac{Q_{h,bu}^{Nutz}}{\eta_{h,tot}\left(\eta_{h,tech}, v_{h,bu}\right)} - s_w \cdot \frac{Q_{w,bu}^{Nutz}}{\eta_{w,tot}\left(\eta_{w,tech}, \eta_{dist,bu}\right) - 1} \qquad (20)$$

Q_{bu}^{End}	*Endenergiebedarf für Raumwärme und Warmwasser in bu*
$\eta_{h,tot}$	*Gesamtwirkungsgrad zur Bereitstellung des Heizwärmebedarfs*
$\eta_{w,tot}$	*Gesamtwirkungsgrad für die Bereitstellung des Warmwasserbedarfs*
$\eta_{h,tech}$	*Wirkungsgrad des installierten Wärmeerzeugers bei Rauwärmebereitstellung in bu*
$v_{h,bu}$	*Vorlauftemperatur des Raumwärmeverteilungssystems*

53 Mögliche Nutzungsarten sind beispielsweise Wohngebäude, Bürogebäude, Schulen etc.

54 Im Folgenden wird der Begriff „Wärmeenergiebedarf“ anstelle von „Energiebedarf für Raumwärme und Warmwasser“ verwendet.

$\eta_{w,tech}$ *Wirkungsgrad des installierten Wärmeerzeugers bei Warmwasserbereitstellung in bu*

$\eta_{dist,bu}$ *Wirkungsgrad des Warmwasserverteilungssystems*

5.3.2 Parametrisierung der Nutzereinflüsse

Die bisher dargestellte Berechnung des Endenergiebedarfs basiert auf bauphysikalischen, technologischen und klimatischen Parametern, was für einen Vergleich der energetischen Qualität zwischen Gebäuden und der installierten Wärmeerzeuger auch sinnvoll ist. Empirische Untersuchungen zeigen jedoch, dass eine signifikante Abweichung zwischen gemessenem und berechnetem Endenergiebedarf existiert, welche durch unterschiedliche Nutzungsweise der Heizsysteme bedingt ist, die sich teilweise auf gebäudespezifische Merkmale zurückführen lassen (Biermayr 1998; Loga 1999; Loga et al. 2003; Mügge 1993). In *Invert/EE-Lab* werden diese Einflüsse durch entsprechende Korrekturfaktoren berücksichtigt. Die im Modell integrierte Berechnungsweise wird in Müller und Biermayr (2011) beschrieben und basiert auf der Methodik von Loga et al. (2003) und den Untersuchungen von Biermayr (1998) und Schriefl (2007).

$$\overline{\theta}_{in,eff} = \overline{\theta}_e + f_{ze} \cdot f_{re} \cdot f_n \cdot (\overline{\theta}_{in,soll} - \overline{\theta}_e) \qquad (21)$$

$\overline{\theta}_{in,eff}$ *Mittlere effektive Innentemperatur*

$\overline{\theta}_{in,soll}$ *Mittlere Soll-Innentemperatur*

$\overline{\theta}_e$ *Mittlere Außentemperatur in der Heizperiode*

f_{ze} *Reduktionsfaktor durch zeitlich eingeschränkte Beheizung*

f_{re} *Reduktionsfaktor durch räumlich eingeschränkte Beheizung*

f_n *Nutzungsfaktor*

Der Einfluss des Nutzerverhaltens zeigt sich in der Abweichung der effektiven Rauminnentemperatur von der Normsolltemperatur, die durch eine räumlich und zeitlich eingeschränkte Beheizung sowie eine allgemeine nutzungsspezifische Komponente bedingt ist. In der Modellrechnung wird die Sollinnentemperatur mit 21 Grad Celsius angesetzt (Recknagel et al. 2002, nach Loga et al. 2003). Die Auswirkung einer zeitlich eingeschränkten Beheizung – z. B. durch Nachtabsenkung – hängt von der thermischen

Qualität der Hülle des jeweiligen Gebäudes ab, wobei ein besserer Wärmeschutz den Effekt verringert[55].

Der allgemeine Nutzungsfaktor stellt eine Normierung zwischen berechneten und gemessenen Endenergiebedarfswerten dar, die insbesondere aus dem Nutzungsverhalten in Abhängigkeit der Heizkosten motiviert ist. Dieser wird ebenfalls über die thermische Qualität der Gebäudehülle parametrisiert, dessen Kalibrierung auf Born et al. (2003) beruht.

$$f_{ze}, f_n \sim \left(H_{T,bu} + H_{V,bu}\right)^{-1} \tag{22}$$

Der Reduktionsfaktor aufgrund einer räumlich beschränkten Beheizung hängt neben der energetischen Qualität der Gebäudehülle insbesondere von der Wohnungsgröße ab, da der Anteil nicht direkt beheizter Räume mit zunehmender Größe und Anzahl Zimmer zunimmt (Loga et al. 2003).

Der mit der effektiven Innenraumtemperatur berechnete Endenergiebedarf wird im Modell um einen weiteren heizsystemspezifischen Servicefaktor korrigiert, der zwischen Einzelraum- und Zentralheizsystemen unterscheidet.

$$Q_{h,bu}^{End,real} = Q_{h,bu}^{End} \cdot f_{h,tech} \tag{23}$$

$$f_{h,tech} = \begin{cases} 0{,}75 & tech: Einzelraumheizung \\ 1 & tech: Zentralheizung \end{cases}$$

5.4 Lebensdauer-Modul: Abriss und Austausch von Gebäudekomponenten

Das Lebensdauer-Modul bestimmt für jeden Simulationsschritt den Anteil der Gebäude, bei denen eine Sanierung durchgeführt wird, sowie den Anteil der Gebäude, bei denen ein Austausch des Wärmeversorgungssystems sattfindet. Des Weiteren wird der Abriss und Neubau von Gebäuden ebenfalls in Abhängigkeit des Gebäudealters ermittelt (vgl. Kranzl et al. 2013). Die Berechnung erfolgt für jedes Referenzgebäude in Abhängigkeit des Alters der Gebäudebauteile und Technologien mittels einer *Weibull-Verteilung*, welche das gängigste statistische Modell zur Beschreibung der Ausfallwahrscheinlichkeit technischer Systeme darstellt (Lawless 2003). Da sich die Lebens-

[55] Die Parameter sind mittels dynamischer Simulation von Loga (1999) ermittelt worden (Loga et al. 2003).

dauer von Gebäudebauteilen und Wärmeversorgungssystemen signifikant unterscheiden, werden die jeweiligen Anteile unabhängig voneinander berechnet. Die relevanten Eingabedaten für die Simulation sind das Installationsjahr der Wärmeversorgungssysteme und das Alter der Bauteile. Da diese Informationen in der Regel nicht jahresscharf vorliegen, sondern Daten zu Baualtersklassen Verwendung finden, werden bei der Berechnung das früheste und jüngste Installations- bzw. Baujahr berücksichtigt. Die Kenngröße der *Weibull*-Verteilung ist die charakteristische Lebensdauer (L_m), bei denen eine Ausfallrate von 63,2 Prozent auftritt.

$$s_{bu,m,T} = \frac{\sum_{t=T-\check{Y}}^{T-\hat{Y}} 1 - e^{-(\frac{t}{L_m})^k}}{\sum_{t=T-\check{Y}}^{T-\hat{Y}} 1 - e^{-(1-\frac{t}{L_m})^k}} \qquad (24)$$

m	*Maßnahme: Sanierung der Gebäudehülle/ Wärmeversorgungssystemtausch*
T	*Simulationsjahr*
$s_{bu,m,T}$	*Anteil der Gebäude, die in bu zum Zeitpunkt T eine Maßnahme durchführen*
$\hat{Y}$	*Frühstes Installationsjahr/Baujahr < T*
$\check{Y}$	*Spätestes Installationsjahr/Baujahr < T*
L_m	*Charakteristische Lebensdauer*
k	*Formparameter der Verteilung k = 5,5*

Basierend auf der charakteristischen Lebensdauer und dem Formfaktor (*k*), welcher die Änderung der Ausfallwahrscheinlichkeit über die Zeit definiert, können Baualtersklassen und technologiespezifische Parameter definiert werden. Kranzl et al. (2013) kalibrieren beide Parameter anhand der Analysen von Meyer et al. (1994) und Wüest (1994)[56]. Der Abriss von Gebäuden (Gebäudeabgang) wird ebenfalls als anteiliger Wert jedes Referenzgebäudesegmentes mittels der *Weibull*-Verteilung ermittelt, wobei die Erhöhung der charakteristischen Lebensdauer durch nachträgliche Sanierungsmaßnahmen berücksichtigt wird. Der Prozess des Gebäuderückbaus und die damit verbundenen Kosten sind nicht Teil des Untersuchungsrahmens dieser Arbeit. Für eine differenzierte Untersuchung von Demontage und selektivem Rückbau von Gebäuden

[56] Die Ausfallrate von Gebäudebauteilen und Wärmeversorgungssystemen nimmt über die Zeit zu (k > 1). Auf Grundlage der Kalibrierung von Kranzl et al. (2013) wird der k-Parameter in der weiteren Analyse einheitlich auf 5,5 gesetzt.

sowie des Recyclings der damit verbundenen Baustoffe sei auf Schultmann (1998) verwiesen.

$$s_{bu,m,T} = \frac{\sum_{t=T-\check{Y}}^{T-\hat{Y}} 1 - e^{-(\frac{t}{L_{bu}}+0{,}5\cdot\sum L_{reno})^k}}{\sum_{t=T-\check{Y}}^{T-\hat{Y}} 1 - e^{-(t-\frac{1}{L_{bu}}+0{,}5\cdot\sum L_{reno})^k}} \qquad (25)$$

L_{reno} *Charakteristische Lebensdauer der erneuerten Gebäudebauteile*

L_{bu} *Charakterische Lebensdauer des Referenzgebäudesegmentes*

Die Neubauaktivität ergibt sich aus der Differenz von Abriss zu der exogen vorgegebenen Entwicklung des Gebäudebestandes über die Zeit.

5.5 Erweiterung zur Modellierung der Investoren und des Investitionsverhaltens

Der zentrale Simulationsalgorithmus zur Wahl des Wärmeversorgungssystems und der Effizienzmaßnahmen wird um ein agentenbasiertes Investitionsentscheidungsmodell ergänzt. Dieses ermöglicht die Definition unterschiedlicher Investoreninstanzen und die Simulation der Technologiewahl unter Berücksichtigung individueller Entscheidungskalküle und Hemmnisse. Eine erste Vorstellung und Zusammenfassung der grundlegenden Methodik dieser Erweiterung (Modell *Invert-Agents)* erfolgte in Steinbach 2013a.

Abbildung 25 zeigt zunächst den Simulationsablauf bei der Technologiewahl für einen Zeitschritt zum Entwicklungsstand vor der Modellerweiterung (vgl. Kranzl et al. 2013; Müller 2012). In jedem Zeitschritt werden Marktanteile der Wärmeversorgungssysteme[57] in den jeweiligen Referenzgebäudesegmenten mit einem *Logit-Ansatz* (vgl. 4.4.1) auf Basis der Annuität der Jahresgesamtzahlungen (Jahresvollkosten) der verfügbaren Technologieoptionen ermittelt. In den Jahresvollkosten werden die kapital-, bedarfs- und betriebsgebunden Kosten[58] berücksichtigt (VDI 2067-1 2000).

---

57 Der Simulationsablauf wird im Folgenden für den Tausch des Wärmeversorgungssystems dargestellt. Für die Wahl der Sanierungsoptionen wird die gleiche Methodik angewendet. Wie bereits beschrieben, findet eine unabhängige Berechnung der Wahl des Wärmeversorgungssystems und der Sanierungsoptionen statt (vgl. 5.4).

58 „Sonstige Kosten“ nach VDI 2067-1 sind in den betriebsgebundenen Kosten berücksichtigt.

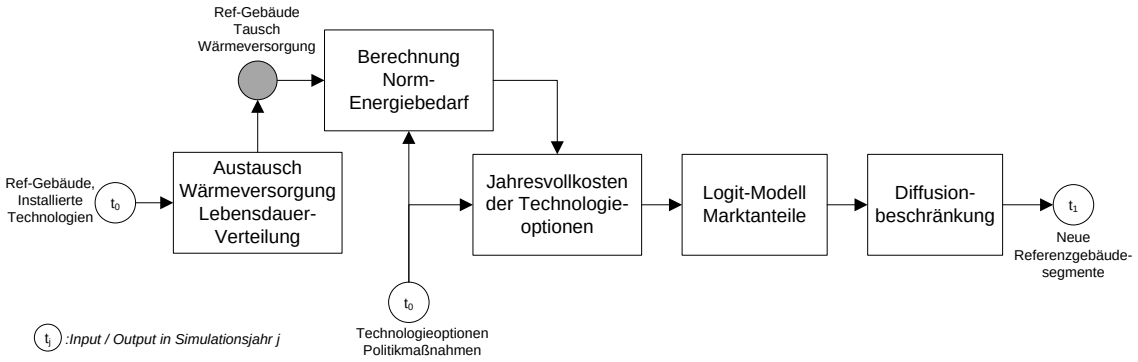


Abbildung 25: Simulationsablauf eines Zeitschritts in INVERT/EE-Lab zum Stand in (Kranzl et al. 2013; Müller and Biermayr 2011)

Abbildung 26 zeigt den veränderten Simulationsablauf mit den in dieser Arbeit vorgenommenen methodischen Erweiterungen.

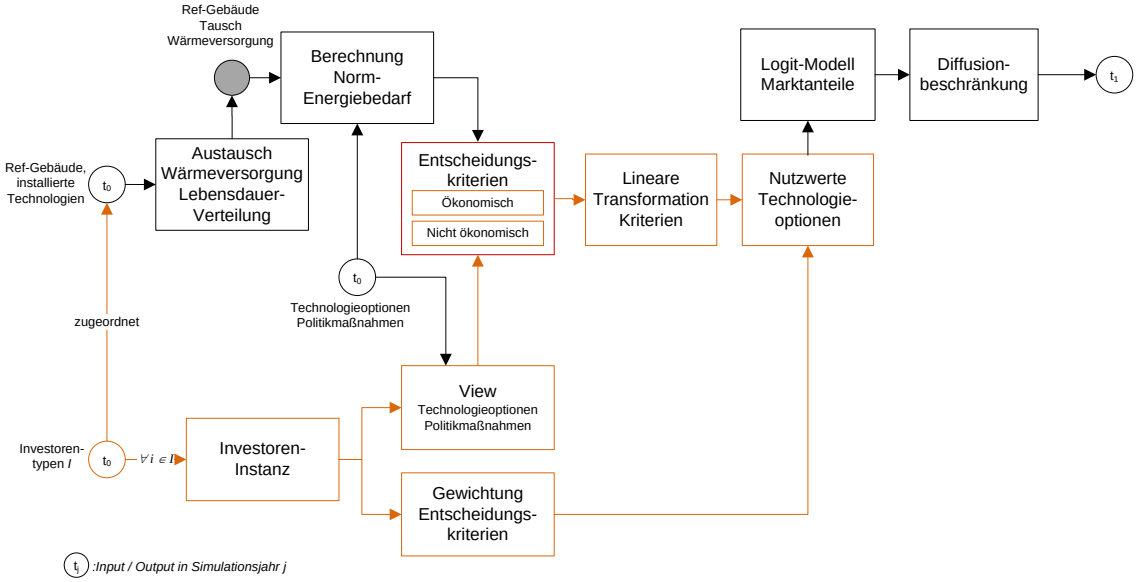


Abbildung 26: Simulationsablauf eines Zeitschritts nach der Modellerweiterung im Rahmen dieser Arbeit

Es wird eine zusätzliche Ebene für die Investoren implementiert, welche den Referenzgebäudesegmenten anteilig als Besitzer zugeordnet werden. Diese Anteile sind zeitabhängig und können somit exogen über den Simulationszeitraum verändert werden. Das Modell erlaubt die Definition beliebig vieler Investorenagenten, welche jeweils Instanzen einer von fünf möglichen Agentenklassen darstellen – *Selbstnutzende Eigentümer*, *Private Vermieter*, *Eigentümergemeinschaften*, *Wohnungsbaugesellschaften, gewerbliche Gebäudebesitzer*.

Als Grundlage der Investitionsentscheidung werden verschiedene ökonomische und nicht-ökonomische Entscheidungskriterien definiert, die für jede Kombination von Investoren, Referenzgebäudesegmenten und Technologieoptionen individuell ermittelt werden. Die Eigenschaften einer Investoreninstanz werden als Eingangsdaten definiert, womit einerseits die Relevanz unterschiedlicher Entscheidungskriterien über Gewichte bestimmt werden, anderseits auch die Ausprägung der Kriterien beeinflusst werden. Somit wird sowohl die Art der Investitionsentscheidung – Berücksichtigung unterschiedlicher Kriterien – als auch die Wahrnehmung der Technologieoptionen und der damit verbundenen Parameterausprägungen unterschieden. Für jede zur Verfügung stehende Technologieoption werden in jedem Referenzgebäudesegment aus Sicht jeder Investoreninstanz Nutzwerte berechnet, auf deren Basis die Marktanteile mit einem *Nested-Logit-Modell* ermittelt werden (vgl. 5.5.3).

5.5.1 Investorenspezifische Wahrnehmung

Jede Technologieoption wird durch unterschiedliche ökonomische und nicht-ökonomische Entscheidungskriterien berücksichtigt. Die Relevanz bzw. die Gewichtung dieser Kriterien aus Sicht der jeweiligen Investoren wird entsprechend der Modelllogik (vgl. 5.4) separat für die Investitionsentscheidung in Energieeffizienzoptionen und Wärmeversorgungssysteme definiert. Die Entscheidungskriterien werden auf Basis der Attribute der Technologieoption (*tech*) und der jeweiligen Referenzgebäudesegmente ermittelt. Die Wahrnehmung des Investors kann zudem zu unterschiedlichen Ausprägungen der Entscheidungsparameter bei Betrachtung derselben Technologie führen. Für jede berücksichtigte Technologieoption lässt sich damit ein investorenspezifischer Vektor der Entscheidungsparameterausprägungen *(x_{in})* bestimmen.

$$\begin{aligned} tech^{hs}_{j,bu,in} &\rightarrow X^{hs}_{j,bu,in} \quad mit\ X^{hs}_{j,bu,in} = \{x^1_{j,bu,in}, x^2_{j,b,a}, \dots, x^k_{j,b,a}\} \\ tech^{reno}_{i,bu,in} &\rightarrow X^{reno}_{i,bu,in} \quad mit\ X^{reno}_{i,bu,in} = \{x^1_{j,bu,in}, x^2_{j,bu,in}, \dots, x^m_{j,bu,in}\} \end{aligned} \tag{26}$$

$tech^{hs}_{j,bu,in}$	*Wärmeversorgungsoptionen bei der Simulation des Wärmeversorgungssystemtausch*
$tech^{reno}_{j,bu,in}$	*Maßnahmenoptionen bei der Sanierung der Gebäudehülle*
$X_{j,bu,in}$	*Vektor der durch Investor in wahrgenommenen Ausprägungen der Entscheidungskriterien*

Mit Bezug auf die Investitionsentscheidungen im Gebäudebereich zeigt sich die unterschiedliche Wahrnehmung beispielsweise darin, inwiefern bestimmte Fördermaßnahmen oder Auflagen bei der Investitionsentscheidung berücksichtigt werden, was insbe-

sondere für die Untersuchung der Wirkung von Politikmaßnahmen relevant ist. So wird die Einhaltung der energetischen Mindeststandards, wie sie durch die Energieeinsparverordnung definiert werden, in *Invert-Agents* nicht global vorgegeben, sondern resultiert aus der spezifischen Wahrnehmung des jeweiligen Investorenagenten. Auch bei der finanziellen Förderung auf Basis von zinsvergünstigten Darlehen ist dieser Wirkungszusammenhang zu beachten: Untersuchungen zum Investitionsverhalten im Gebäudebereich zeigen, dass bei bestimmten Gruppen von Eigenheimbesitzern eine geringe Breitschaft zur Aufnahme von Krediten besteht (Albrecht and Zundel 2010; Stieß et al. 2010). Eine pauschale Berücksichtigung dieser Förderung bei der Investitionsentscheidung führt demnach zu einer Überschätzung der Wirkung dieser Politikmaßnahmen.

Die Parametrisierung der investorenspezifischen Wahrnehmung wird durch die Implementierung folgender Variablen erreicht:

- *Information_awareness (inf)* definiert innerhalb einer Investoreninstanz den Anteil der Investoren, welche regulative Politikinstrumente bei der Sanierungsentscheidung wahrnehmen – z. B. Berücksichtigung der Mindestanforderungen durch die Energieeinsparverordnung (vgl. 5.5.4)
- *Awareness_subsidies (asub)* wird als binäre Variable definiert und gibt an, ob eine Investoreninstanz mögliche Subventionen bei der Investitionsentscheidung berücksichtigt – wie sie beispielsweise durch das Marktanreizprogramm gewährt werden (vgl. 5.5.4)
- Die Variable *Risk_aversion* (risk) definiert, ob der jeweilige Investorenagent den Zugang zu kreditbasierter Finanzierung hat bzw. ob generelle Abneigungen gegenüber einer nicht durch Eigenkapital finanzierten Investition besteht. Relevant ist dies insbesondere daher, da in Deutschland und vielen EU-Mitgliedsländern zinsvergünstigte Kredite die zentralen Förderinstrumente für Energieeffizienzmaßnahmen in Gebäuden darstellen (vgl. 3.3.5)
- Die Variable *Energy_price_calculation (pcalc)* definiert die Art der Energiekostenberechnungen der jeweiligen Investoreninstanz bzw. ob diese auf Grundlage der derzeitigen oder der vergangenen Energiepreise oder auf Basis der beobachteten Energiepreissteigerung ermittelt wird (vgl. 5.5.2)

Die Zuordnung der Investoren zu der Agentenklasse legt die Nutzung des Gebäudes durch den jeweiligen Investorenagenten fest. Sofern es sich beispielsweise um einen selbstnutzenden Eigentümer handelt, finden Energiekosten bzw. Energieeinsparung Berücksichtigung bei der Investitionsentscheidung; im Falle von Vermietern wird hingegen die mögliche Refinanzierung über Mieterhöhungen bzw. die Umlage auf die Miete berücksichtigt.

5.5.2 Kriterien und Strategien der Investitionsentscheidung

Im Folgenden wird die Implementierung der Entscheidungskriterien im Modell dargestellt (Tabelle 10). Diese bilden die Grundlage der agentenspezifischen Entscheidungsfindung und erlauben die Simulation unterschiedlicher Strategien bei der Investitionsentscheidung auf Basis der Attribute der Technologieoptionen. Mit den implementierten Entscheidungskriterien wird versucht, die in der empirischen Literatur am häufigsten angewendeten erklärenden Variablen unter Berücksichtigung der Grenzen des Simulationsmodells abzudecken (vgl. 4.4.2: Tabelle 8).

Tabelle 10: Im Modell implementierte Entscheidungskriterien

Simulation der Wahl des Wärmeversorgungsystems	Simulation der Wahl der Sanierungsoption
Investition	Investition
Verbrauchsgebundene Kosten	Energiekosteneinsparung
Amortisationszeit	Amortisationszeit
Jahresvollkosten	Jahresvollkosten
Nachhaltigkeit	Zusätzliche Mieteinnahmen
Komfort	Komfort/Wertsteigerung Gebäude
Ähnlichkeit zum bestehenden Wärmeversorgungssystem	
Marktanteile	

Investitionen unter Berücksichtigung von Energieträgerwechsel

Als Eingangsdaten werden spezifische Investitionen der Technologieoptionen in Abhängigkeit der thermischen Leistung des Wärmeerzeugers bzw. der Gebäudegröße im Falle von Sanierungsoptionen definiert. Bei Sanierungsoptionen werden die spezifischen Investitionen pro Quadratmeter Bruttogeschossfläche in Abhängigkeit der existierenden Qualität der Gebäudehülle der jeweiligen Referenzgebäudesegmente definiert. Die thermische Leistung des Wärmeversorgungssystems wird für jedes Referenzgebäude in Abhängigkeit des Wärmebedarfs ermittelt. Bei der Wahl des Wärmeversorgungssystems werden zusätzlich Investitionen berücksichtigt, die bei einem möglichen Wechsel des Energieträgers anfallen[59]. Diese werden in *Invert-Agents* technologiespezifisch und energieträgerabhängig berechnet. Als Eingangsdaten werden

[59] Z. B. Investitionen in einen Gasanschluss, wenn vorher kein gasbefeuerter Wärmeerzeuger installiert war

diese für jede Technologie als Anteil an den Gesamtinvestitionen definiert. Zusätzlich werden absolute Werte als Unter- und Obergrenze vorgegeben, da für die zusätzlich anfallenden Investitionen aufgrund eines Energieträgerwechsels in vielen Fällen nur in bestimmten Grenzen ein linearer Zusammenhang mit den Gesamtinvestitionen besteht[60]. Die Energieträgerwechselfaktoren bestimmten, ob diese Investitionen bei einem bestimmten Wechsel anfallen. Zusammenfassend setzen sich die bei der Investitionsentscheidung berücksichtigten Investitionen folgendermaßen zusammen.

$$I_{j,i,bu,t}^{tot,hs} = I_{j,bu}^{hs} \cdot +min\left(max\left(I_j^{hs} \cdot \epsilon_j^{ecc}, \check{I}_j^{ecc}\right), \hat{I}_j^{eec}\right) \cdot \gamma_{ec_j,ec_i} \qquad (27)$$

$I_{j,i,bu}^{tot}$:	*Investitionen bei Heizsystemwechsel von i auf j*
I_j^{hs}:	*Investitionen Wärmeerzeuger*
$\check{I}_j^{ecc}, \hat{I}_j^{eec}$:	*Minimale und maximale technologieabhängige Investitionen durch Energieträgerwechsel*
ϵ_j^{ecc}:	*Relative Investitionen durch Energieträgerwechsel als Anteil von Investitionen in Wärmeerzeuger j*
γ_{ec_j,ec_i}:	*Energieträgerwechselfaktor bei Wechsel von Energieträger des Wärmeerzeugers i auf Energieträger des Wärmeerzeugers j*

Energiekosten, Energiekosteneinsparungen und Mietumlage

Die Energiekosten werden in Abhängigkeit der Endverbraucherpreise der einzelnen Energieträger im Modell berechnet, die jahresscharf als Eingangsdaten definiert werden.

$$c_{j,bu,in,t} = pcalc_{in}\left(p_{ec_j,t}, p_{ec_j,t-1}, \dots, p_{ec_j,t-n}\right) \cdot Q_{j,bu,t}^{End} \qquad (28)$$

$c_{j,bu,in,t}$:	*Kalkulierte jährliche Energiekosten eines Investor-Agenten*
p_{ec_j} :	*Energiepreis des jeweiligen Energieträgers von Wärmeversorgungssystem j*
$Q_{j,bu,t}^{End}$ ::	*Endenergiebedarf für Raumwärme und Warmwasser bei Wärmeerzeuger j in Gebäude bu*

Die Wirtschaftlichkeit der Wärmeversorgungssysteme und Energieeffizienzoptionen hängt maßgeblich von der Entwicklung der Energiepreise ab. Die exogen vorgegebene

[60] Z. B. Investitionen in einen Gasanschluss

zukünftige Energiepreisentwicklung ist für die Investorenagenten im Modell jedoch nicht sichtbar (Abbildung 27). Diese kennen zum Entscheidungszeitpunkt nur die aktuellen Energiepreise sowie die Energiepreisentwicklung aus den vergangenen Perioden.

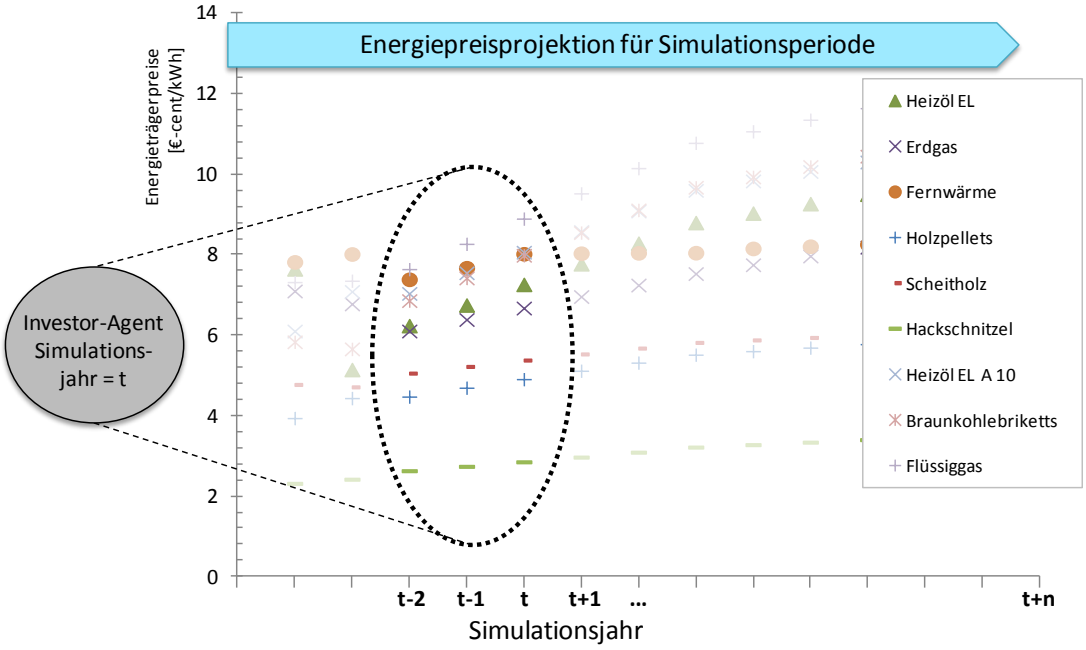


Abbildung 27: Schematische Darstellung der Energieträgerpreis-Wahrnehmung implementiert in *Invert-Agents*

Vor diesem Hintergrund werden im Modell, wie bereits in Kapitel 5.5.1 eingeführt, aus Sicht der Investoreninstanzen unterschiedliche Möglichkeiten zur Kalkulation der Energiekosten implementiert:

- Energiekosten werden auf Basis der aktuellen Energiepreise zum Zeitpunkt der Investitionsentscheidung kalkuliert. Dies unterstellt, dass gegenwärtige Energiepreise von Konsumenten am stärksten wahrgenommen werden, da diese Informationen unmittelbar zur Verfügung stehen – über aktuelle Heizkostenabrechnungen, Informationsportale im Internet, Medienberichte.

$$pcalc_{in} = p_{ec_{j,t}} \tag{29}$$

- Energiekosten werden auf Basis der gewichteten Energiepreise der letzten drei Perioden berechnet. Bauermann und Weber (2011) liefern empirische Evidenz, dass der Energiepreisvorteil bei der Wärmeversorgung von Dauer sein muss, damit sich dies auf die Investitionsentscheidung auswirkt. Daraus lässt sich ableiten, dass nicht nur die aktuellen Energiepreise, sondern auch die der Vorpe-

riode ebenfalls eine Rolle spielen. Kranzl et al. (2013) schlagen daher folgende Gewichtung für die Energiepreise vor:

$$pcalc_{in} = 0{,}3 \cdot p_{ec_j,t} + 0{,}5 \cdot p_{ec_j,t-1} + 0{,}2 \cdot p_{ec_j,t-2} \tag{30}$$

- Die jährlichen Energiekosten werden mittels der Annuitätenmethode ermittelt. Dazu wird die Annuität aus den gesamten über die Nutzungsdauer anfallenden und auf den Investitionszeitpunkt abgezinsten Energiekosten berechnet. Die darin berücksichtigte Energiepreissteigerung wird aus der beobachteten durchschnittlichen Energiepreisentwicklung der vergangenen Perioden ermittelt und über die Nutzungsdauer konstant fortgeschrieben, woraus sich eine vereinfachte Berechnung mittels des preisdynamischen Barwertfaktors ergibt (vgl. 4.2.3) Dieses Vorgehen entspricht einer der betriebswirtschaftlichen Investitionsrechnung konformen Berechnungsweise (vgl. 4.2.3) und ist demnach einem rationell, nach ökonomischen Gesichtspunkten agierenden Agenten zuzuordnen.

$$pcalc_{in} =\cdot p_{ec_j,t} \cdot \frac{1 - \left(\frac{1-\Delta p_{ec_j}}{1-r_{in}}\right)^T}{r_{in} - \Delta p_{ec_j}} \tag{31}$$

$$\Delta p_{ec_j} = \frac{1}{2} \cdot \left(\frac{(p_{ec_j,t-2} - p_{ec_j,t-1})}{p_{ec_j,t-2}} + \frac{(p_{ec_j,t-1} - p_{ec_j,t})}{p_{ec_j,t-1}} \right)$$

r_{in} *Kalkulatorischer Zinssatz des Investorenagenten*

T *Nutzungsdauer*

Bei der Simulation der Investitionsentscheidung des Wärmeversorgungssystems werden mit diesem Kriterium die wahrgenommenen Energiekosten der einzelnen Technologieoptionen verglichen. Bei der Investitionsentscheidung der Energieeffizienzmaßnahmen werden hingegen die realisierten Einsparungen mit den wahrgenommenen Energiepreisen des in dem Referenzgebäudesegment jeweils installierten Wärmeversorgungssystems bewertet:

$$\Delta c_{j,bu,in,t} = pcalc_{in}\left(p_{ec_j,t}, p_{ec_j,t-1}, \dots, p_{ec_j,t-n}\right) \cdot \left(Q^{End}_{hw,bu,t-1} - Q^{End}_{hw,bu,t}\right) \tag{32}$$

Handelt es sich bei den Investoren um Vermieter, kommen mögliche Energiekostenreduktionen nicht diesem direkt zu. Für alle Investoreninstanzen, die einer Vermieter-

Klasse zugeordnet sind, werden daher die mögliche Refinanzierung über zusätzliche Mieteinahmen berechnet. Dazu wird der Anteil der Investitionen, der auf die Miete umgelegt werden kann, als Input definiert.

Amortisationszeit

Dieses Entscheidungskriterium stellt eine Methode der betriebswirtschaftlichen Investitionsrechnung dar (vgl. 4.2.3). Die Investitionsalternativen werden mit der statischen Amortisationsrechnung unter Berücksichtigung der individuell wahrgenommen Energie- und Betriebskosteneinsparungen bewertet.

$$payback_{j,bu,in,t} = \frac{I_{j,bu,t}^{tot}}{\Delta c_{j,bu,in,t} + \Delta c_{j,bu,in,t}^{op}} \tag{33}$$

$\Delta c_{j,bu,in,t}$ *Wahrgenommene Energiekosteneinsparungen*

$\Delta c_{j,bu,in,t}^{op}$ *Wahrgenommene Betriebskosteneinsparungen*

Annuität der Jahresgesamtzahlungen (Jahresvollkosten)

Das Kriterium stellt eine Methode der dynamischen Investitionsrechnung dar, welches ebenfalls bereits in Abschnitt 4.2.3 eingeführt wurde. Wie beim Kriterium Amortisationszeit besteht jedoch auch hier die Möglichkeit einer weiteren Differenzierung zwischen einzelnen Investorenagenten anhand der wahrgenommen jährlichen Energie- und Betriebskosten.

$$total_cost_{j,bu,in,t} = I_{j,bu,t}^{tot} \cdot \frac{r_{in}}{(1-(1-r_{in})^{-T}} + c_{j,bu,in,t} + c_{j,bu,in,t}^{op} \tag{34}$$

r_{in} *Kalkulatorischer Zinssatz für Investorenagent in*

Die Implementierung beider Verfahren im Modell begründet sich damit, dass sowohl Amortisations- als auch die Annuitätenmethode als Wirtschaftlichkeitsbewertung gebäudetechnischer Investitionen eingesetzt und empfohlen werden (VDI 2067-1 2000). In der Bewertung der relativen und auch absoluten Vorteilhaftigkeit führen sie jedoch mitunter zu unterschiedlichen Ergebnissen.

Nachhaltigkeit/Umweltnutzen

Das Kriterium „Nachhaltigkeit“ wird als Maß für den ökologischen Nutzen eines Wärmeversorgungsystems aus Sicht des Investors implementiert. Inwiefern dieser bei der Entscheidung Berücksichtigung findet, hängt – wie bei allen Kriterien – von der individuellen Gewichtung der Investorenagenten ab. Im Gegensatz zu den bisher dargestellten Entscheidungskriterien lässt sich dieses Kriterium allerdings nicht durch eine eindeutige Messung quantifizieren. Methoden zur Einbeziehung von Umweltaspekten in die betriebswirtschaftliche Investitionsrechnung werden in Jochum (2001) und Schultmann et al. (2002) diskutiert. In den dargestellten Ansätzen werden Emissionsmengen bzw. Stoff- und Energieströme in der ökologischen Bewertung entweder direkt berücksichtigt oder ein Ansatz zur Monetarisierung über Umweltabgaben oder die Berechnung sozialer Kosten verfolgt.

Die theoretischen Ansätze sind für die Abbildung des Nachhaltigkeitsnutzens in der realen Investitionsentscheidung von überwiegend privaten Akteuren jedoch nur bedingt geeignet. Abhängig von individuellen Normen und Ansichten kann der Nachhaltigkeitsnutzen einer bestimmten Technologieoption in der realen Entscheidung sehr unterschiedlich bewertet werden. Wie in Abschnitt 4.4.2 dargestellt, gibt es in der empirischen Literatur zu Investitionsentscheidungen eine Reihe von *Choice*-Experimenten, die versuchen, wahrgenommene Präferenzen und Zahlungsbereitschaften für bestimmte Produktcharakteristiken wie Umweltnutzen zu quantifizieren (vgl. Tabelle 8). Allerdings wird dabei die Skala entweder dem Befragten in Form von Produktattributen vorgegeben (*Stated Preference),* oder aus realen Marktdaten abgeleitet (*Revealed Preference*), was wiederum einer Interpretation durch den Wissenschaftler erfordert. Bei *Stated-Preference*-Experimenten, in denen abstrakte Alternativen zur Wahl gestellt werden, kann aufgrund des Befragungsdesigns nur eine begrenzte Anzahl an ökonomischen und nicht-ökonomischen Attributen berücksichtigt werden. Das Attribut „Umweltnutzen“ wird somit in der Regel auch durch eine entsprechende Messgröße repräsentiert, welche in vielen empirischen Untersuchungen zur Wärmeversorgungswahl mit den wahrgenommenen Einsparungen von Treibhausgasemissionen parametrisiert ist (vgl. Achtnicht 2010; Claudy et al. 2011; Rouvinen and Matero 2012). Der Bewertung des Umweltnutzens könnte jedoch beispielsweise auch auf Grundlage der Schadstoffemissionen erfolgen. Unabhängig von der unterstellten Messgröße kann der Umweltnutzen einer Alternative aus psychologischen Gründen oder aufgrund fehlender Information jedoch auch unterschiedlich wahrgenommen werden. In einem *Choice* Experiment unter selbstnutzenden Eigentümern ermittelt Achtnicht (2010) beispielsweise, dass Treibhausgaseinsparungen durch Energieeffizienzmaßnahmen an der Gebäude-

hülle nicht mit dem gleichen Nutzen wahrgenommen werden wie solche, die durch den Wechsel des Wärmeversorgungssystems realisiert werden[61]. In psychologischen Modellen wird daher die Relevanz von Werten und gesellschaftlichen Normen berücksichtigt (vgl. 4.4.3). In Abhängigkeit der herrschenden Ansichten innerhalb eines Landes, einer Region oder unter der primären sozialen Bezugsgruppe resultieren demnach unterschiedliche Bewertungen für den Umweltnutzen einzelner Energieträger.

Vor diesem Hintergrund werden im Modell zwei Methoden zur Bestimmung der Nachhaltigkeitsausprägung implementiert, welche je nach Untersuchungsgestand und empirischer Datenlage verwendet werden können. Zum einen wird das Nachhaltigkeitskriterium auf Basis der technologischen- und gebäudespezifischen Treibhausgasemissionen berechnet. Als Eingangsdaten werden dazu spezifische THG-Emissionen der einzelnen Energieträger definiert. Auf dieser Basis werden im Modell die jährlichen Gesamtemissionen – technologie- und gebäudespezifisch – aus dem berechneten Wärmeendenergiebedarf im jeweiligen Simulationsjahr ermittelt.

$$sustainability_{j,bu,in,t} = e_{ec_j}^{CO_2} \cdot Q_{hw,bu,t}^{End} \qquad (35)$$

$e_{ec_j}^{CO_2}$: *Spezifische Treibhausgasemissionen [t/kWh Endenergie]*

Als zweite Methode wird eine technologiespezifische Nachhaltigkeitsbewertung implementiert, welche eine direkte Zuweisung des relativen Umweltnutzens einer Technologieoption im Vergleich zu den anderen zur Verfügung stehenden Optionen erlaubt. Diese Methode kann angewendet werden, falls wie oben dargestellt anzunehmen ist, dass Normen und Werte existieren, die einer Quantifizierung des wahrgenommenen Umweltnutzens auf Basis emittierter Schadstoffe oder THG-Emissionen entgegensteht.

Für die in dieser Arbeit durchgeführte Anwendung des Modells auf Deutschland werden spezifische Emissionen mit Vorketten auf Basis von *GEMIS* für die einzelnen Wärmeversorgungssysteme hinterlegt (INAS 2013). In Deutschland ist die Diskussion über den Umweltnutzen einer effizienten und auf erneuerbaren Energien basierenden Wärmeversorgung insbesondere mit Einsparungen der Treibhausgasemissionen verbunden, was sich institutionell durch entsprechende Zielvorgaben und Förderprogramme zeigt (vgl. Kapitel 3). In der Bevölkerung wird der Klimawandel als eine der zentralen umweltpolitischen Herausforderungen angesehen (EC 2008), woraus sich als dominierende gesellschaftliche Norm für den wahrgenommenen Umweltnutzen einer

[61] Achtnicht (2010) vermutet, dass negative Umwelteinflüsse durch die Verbrennung von Brennstoff direkter und stärker mit dem Wärmeversorgungssystem assoziiert werden.

Technologieoption die damit verbundene Minderung der THG-Emissionen ableiten lässt. Anstelle der spezifischen THG-Emissionen ließen sich auch spezifische Schadstoffemissionen als Grundlage der Berechnung des Umweltnutzens mit dieser Methode hinterlegen.

Komfort

Dieses Kriterium wird in empirischen Untersuchungen ebenfalls als eine relevante nicht-ökonomische Zielgröße bei der Investitionsentscheidung genannt (vgl. Tabelle 8). Im Simulationsmodell wird die Variable als Produkteigenschaft der jeweiligen Technologieoption implementiert und stellt den relativen Nutzen im Vergleich zu den anderen zur Verfügung stehenden Optionen dar. Zur Bestimmung der Ausprägung dieses Kriteriums für die im Modell implementierten Wärmeversorgungssysteme wird eine Expertenbefragung durchgeführt. Der Komfort wird dazu anhand folgender Eigenschaften parametrisiert, die als positive Aussagen formuliert werden und den Experten zur Bewertung mittels einer sechsstufigen *Likert-Skala*[62] vorgelegt werden.

- Grad der Autonomie im Betrieb: Der Komfort ist umso höher, je geringer der benötigte Eingriff des Nutzers bei Aufrechterhaltung der Wärmeversorgung ist. Hierbei spielt insbesondere die Art der Brennstoffeinbringung und die Art der Wärmeübergabe eine Rolle.
- Geringer Platzbedarf für Technik und Brennstoff: Leitungsgebundene Energieträger benötigen weniger Platz als lagerbarer Energieträger, der damit anderweitig verwendet werden kann.
- Niedrige Geräuschentwicklung
- Niedrige Geruchsbelastung
- Förderlich für das Wohnambiente

Der resultierende Komfortnutzen der einzelnen Wärmeversorgungssysteme wird aus dem Mittelwert der einzelnen Eigenschaften ermittelt. Insgesamt fließt die Bewertung von vier Experten aus drei unterschiedlichen Forschungsinstituten im Bereich der Energiesystemanalyse im Gebäudebereich ein. Der an die Experten versendete Fragebogen sowie die Ergebnisse der Einzelbewertungen sind im Anhang A.2 darge-

[62] Codierung von (1) trifft überhaupt nicht zu bis (6) trifft voll und ganz zu

stellt[63]. Abbildung 28 zeigt die resultierenden Mittelwerte der Gesamtbewertung über die befragten Experten.

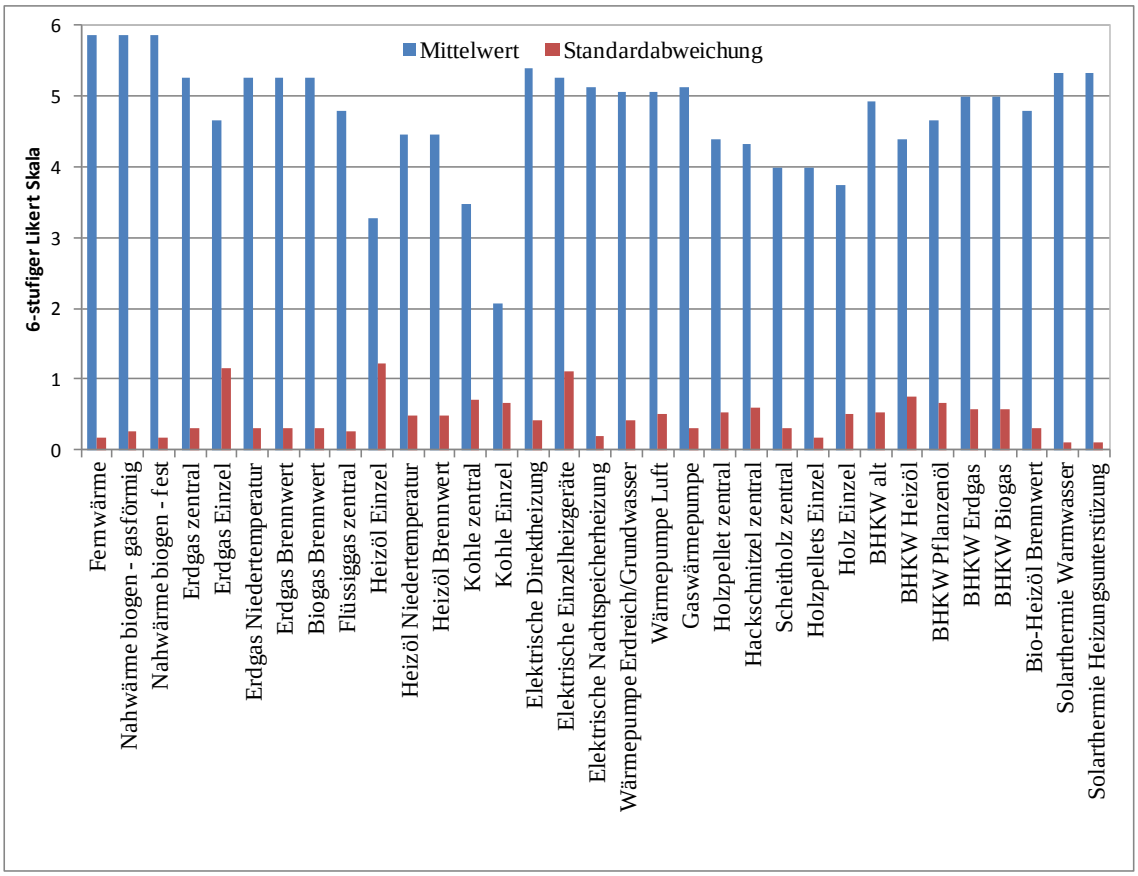


Abbildung 28: Ergebnisse der Expertenbefragung zum Komfortnutzen von Wärmeversorgungssystemen

Bei Energieeffizienzmaßnahmen an der Gebäudehülle wird der Komfortnutzen unterschieden, ob es sich um eine energetische Sanierung oder um eine reine Instandhaltung bzw. -setzung handelt. Im Rahmen der Wirtschaftlichkeitsberechnung der Gebäudesanierung werden Instandsetzung und Instandhaltung auch als ohnehin anfallende Maßnahmen charakterisiert (vgl. 4.2.3). In der Rechtsprechung werden diese als Erhaltungsmaßnahmen definiert (BGB:§ 555b) und klar gegenüber einer Modernisierung des Gebäudes abgrenzt, worunter auch „Maßnahmen zur Einsparung von Endenergie zählen (BGB:§ 555b). Insofern werden den im Modell definierten Optionen, bei denen

63 Der Fragebogen wird per E-Mail verschickt und von den Experten selbstständig ausgefüllt. Der Fragebogen wird von Experten vom *Öko-Institut*, der *Energy Economics Group der Technischen Universität Wien* und des *Fraunhofer-Instituts für System- und Innovationsforschung ISI* ausgefüllt. Darunter auch der Verfasser dieser Arbeit.

es sich um ohnehin anfallende Instandsetzungs- und Instandhaltungsmaßnahmen an der Gebäudehülle handelt, kein Komfortgewinn gegenüber dem Status quo zugeschrieben.

Ähnlichkeit zum bestehenden Wärmeversorgungssystem

Mit Bezug auf die Theorie des Konsumentenverhaltens und der psychologischen Verhaltensmodelle wird mit diesem Entscheidungskriterium die Strategie der „Wiederholung“ nach Jager (2000) bzw. eine Rekognitionsheuristik (Goldstein and Gigerenzer 1999) im Modell abgebildet (vgl. 4.4.4). Unter dieser Strategie entscheiden sich Konsumenten für das Produkt, welches ihnen bekannt ist bzw. für welches sie sich bereits zuvor entschieden haben. Mit Bezug auf die Wärmeversorgung ist dies umso relevanter, da dem Tausch des Wärmeversorgungssystems in vielen Fällen ein Ausfall des vorhandenen Systems am Ende der Lebensdauer vorrausgeht, wodurch eine einfache Entscheidungsstrategie angewendet wird. Die Parametrisierung in *Invert-Agents* erfolgt im Gegensatz zum Modell von Sopha (2011) (vgl. 4.4.5) jedoch nicht als einfache binäre Entscheidungsstrategie – wähle gleiches Wärmeversorgungssystem wieder – sondern durch Berechnung eines Nutzwertes in Abhängigkeit der Ähnlichkeit zum bestehenden System. Dies ist zum einen durch die hohe technologische Differenzierung begründet, die im Modell implementiert ist. Wärmeversorgungsysteme gleicher Bauart und mit gleichem Energieträger sind damit für einen Investor, der solch eine Strategie wählt, kaum unterscheidbar. Zum anderen kann mit dieser Methode der technologische Fortschritt berücksichtigt werden, wenn bestehende Versorgungssysteme aufgrund neuer Standards nicht mehr installiert werden.

Derzeitiger Marktanteil

Dieses Kriterium operationalisiert eine Heuristik der „Imitation der Mehrheit“ (Gigerenzer 2008; Jager 2000), womit bekannte und etablierte Technologien ein niedrigeres Risiko und damit einen höheren Nutzen für den Investor zugeschrieben werden (vgl. 4.4.4, 4.4.5). Dies ist insbesondere für Situationen relevant, in denen eine hohe Unsicherheit über die zur Verfügung stehenden Optionen besteht. Mit dem Kriterium lassen sich somit auch informatorische Hemmnisse der Investorenagenten abbilden.

5.5.3 Simulation der Technologiewahl

Die Bewertung der Technologieoptionen erfolgt durch Ermittlung des Gesamtnutzens auf Basis der für den jeweiligen Investorenagenten relevanten Entscheidungskriterien.

Die Ausprägungen der Entscheidungskriterien werden dazu zunächst auf eine einheitliche Skala linear transformiert. Dem zugrunde liegt die Annahme, dass nur der Ab-

stand zwischen Nutzwerten relevant ist und nicht der absoluten Wert (Train 2003). Der resultierende Wert ist Maß für den individuell wahrgenommenen relativen Nutzen hinsichtlich des jeweiligen Kriteriums im Vergleich zu allen anderen zur Verfügung stehenden Technologieoptionen.

$$norm(x^i_{j,bu,in}) = x^i_{j,bu,in} \cdot (\max_j(x^i_{j,bu,in}))^{-1} \ f\ddot{u}r\ x^i_j > x^i_k => x^i_j \succ x^i_k \ \ \forall\, j,k \in J \qquad (36)$$

$$norm(x^i_{j,bu,in}) = (x^i_{j,bu,in})^{-1} \cdot (\max_j(x^i_{j,bu,in})^{-1}))^{-1} \ f\ddot{u}r\ x^i_j < x^i_k => x^i_j \succ x^i_k \ \forall\, j,k \in J$$

$x^i_{j,bu,in}$:	*Wahrgenommene Ausprägung von Entscheidungskriterium i für Technologieoption j in Referenzgebäude bu*
J	*Menge der Technologieoptionen*

Der Gesamtnutzwert wird für jeden Investorenagenten als lineare Funktion aus den Einzelnutzwerten mit den individuellen Gewichtungen berechnet. Ein linearer Zusammenhang wird auch als generelle Spezifikation für den beobachtbaren Anteil des Nutzwertes in *Discrete-Choice*-Analysen angenommen (vgl. Train 2003). Der von einem Investorenagenten wahrgenommene Gesamtnutzwert einer Technologieoption in einem Referenzgebäude wird damit folgendermaßen ermittelt:

$$V_{j,bu,in} = \sum_{i=1}^{I} \beta_{i,in} \cdot norm(x^i_{j,bu,in}(inf_{in,}, asub_{in}, risk_{in,} pcalc_{in}, invc_{in}))$$
$$\sum_{i=1}^{I} \beta_{i,in} = 1; \beta_{i,in} \in \mathbb{R}^+ \mid \beta_{i,in} \leq 1 \qquad (37)$$

$\beta_{i,in}$:	*Gewichtung des Entscheidungskriteriums i bei Investorenagent* $\beta_{i,in} \in \mathbb{R}^+ \mid \beta_{i,in} \leq 1 \ \forall i, in$
inf_{in}:	*Informationswahrnehmung* $\mathrm{inf}_{in} \in \mathbb{R}^+ \mid \mathrm{inf}_{\mathrm{n}} \leq 1$
$asub_{in}$	*Bewusstsein über Fördermittel* $asub_{in} \in [0,1]$
$risk_{in}$:	*Risikoaversion* $risk_{in} \in [0,1]$
$pcalc_{in}$:	*Energiepreiswahrnehmung*
$invc_{in}$:	*Agentenklassen: Nutzung des Gebäudes*

Die Nutzwerte stellten die Grundlage für die Berechnung der resultierenden Marktanteile der Technologien innerhalb einer Investoreninstanz und innerhalb eines jeden Referenzgebäudes dar. Dabei ist der wahrgenommene Nutzwert einer Technologieoption ein Maß für die Marktdurchdringungen innerhalb der jeweiligen Investoren-Gebäude-Kombination. Im Sinne der *Discrete-Choice*-Analyse stellen die berechneten Nutzwerte nur den beobachtbaren Teil des Nutzwertes bei der Technologiewahl dar, auf deren Basis sich die Wahrscheinlichkeit, dass die jeweilige Technologieoption *j* gewählt wird, mittels einer logistischen Verteilungsfunktion ermitteln lässt (vgl. 4.4.2). Sofern eine Vielzahl von Einzelentscheidungen betrachtet werden, lassen sich die Wahrscheinlichkeitswerte mit den prognostizierten Marktanteilen interpretieren. Die Simulation der Investitionsentscheidungen eines Agenten innerhalb eines Referenzgebäudesegmentes fasst ebenfalls eine Vielzahl von Einzelentscheidung zusammen, wodurch die Anwendung einer *Logit*-Modells motiviert ist. Die folgende Formel zeigt zunächst die Berechnung der Marktanteile auf Basis eines *multinominalen Logit*-Modells.

$$ms_{j,bu,in,t} = \frac{e^{\hat{V}_{j,bu,in,t}}}{\sum_{j=1}^{J} e^{\hat{V}_{j,bu,in,t}}} \qquad (38)$$

$$\hat{V}_{j,bu,int} = \frac{V_{j,bu,in,t}}{\sum_{j=1}^{J} ms_{j,bu,in,t-1} \times V_{njb,t}} \cdot \lambda$$

$ms_{j,bu,in,t}$ *Maximale Marktanteile der Technologieoption j in Referenzgebäudesegment bu für Investor-Agent in*

$\hat{V}_{j,bu,int}$ *Relativer Nutzen von Technologieoption j in Referenzgebäudesegment bu für Investor-Agent in*

λ *Skalierungsparameter*

Der Skalierungsparameter (λ) entspricht im *Logit*-Modell der skalierten Varianz der nicht beobachteten Parameter. Dieser ändert nicht das Verhältnis zwischen den Gewichtungen einzelner Kriterien, definiert jedoch die Steigung der Marktanteilskurve und damit die Homogenität der Investitionsentscheidung innerhalb der definierten Investorenagenten. Für $\lambda \to \infty$ folgt eine reine Nutzwertmaximierung, d. h. die Technologie mit dem höchsten Nutzwert erhält den gesamten Marktanteil. Für $\lambda = 0$ folgt eine Gleichverteilung der Marktanteile auf alle dem Investorenagenten zur Verfügung stehenden Technologieoptionen.

Wie bereits in Kapitel 4.4.2 diskutiert, setzt das *multinominale Logit-Modell* jedoch die sogenannte „Unabhängigkeit von irrelevanten Alternativen (*IIA*)“ voraus; d. h. das Ver-

hältnis der Wahlwahrscheinlichkeiten zweier Alternativen ist unabhängig von anderen Alternativen. Bei der Wahl zwischen Wärmeversorgungsvarianten bildet diese Annahme jedoch nicht die Realität ab, da durch die Einführung ähnlicher Technologie eine Substitution zwischen den Alternativen wahrscheinlich ist. Zur Erläuterung sei angenommen, dass es zwei Wärmeversorgungssysteme gibt, die sich hinsichtlich des Energieträgers – Erdgas und Biomasse – unterscheiden und jeweils eine fünfzigprozentige Wahlwahrscheinlichkeit bzw. Marktanteile zugeschrieben bekommen. Das Verhältnis der beiden Wahlwahrscheinlichkeiten beträgt somit eins. Angenommen, es wird nun eine zweite Erdgastechnologie eingeführt, die eine etwas bessere Effizienz aufweist, aufgrund höherer Investitionen jedoch mit gleichem Nutzwert bewertet wird. Das Verhältnis der Wahlwahrscheinlichkeiten der beiden Erdgastechnologien beträgt somit eins. Da jedoch auch die Verhältnisse der Wahlwahrscheinlichkeiten zwischen der alten Erdgastechnologie und Biomasse aufgrund der Annahmen des *Logit-Modell* konstant bleiben, resultiert für jede Technologie eine Wahlwahrscheinlichkeit von einem Drittel. In der Realität würde man allerdings vermuten, dass eine stärkere Substitution zwischen der alten und neuen Erdgastechnologie stattfindet und dass die Marktanteile der Biomassetechnologie nicht von 50 auf 33 Prozent nur aufgrund der Einführung einer zweiten Erdgastechnologie sinken. Ähnliches gilt für Energieeffizienzmaßnahmen, wenn beispielsweise als Optionen die nicht-energetische Sanierung (Instandsetzung) gegenüber energietischen Maßnahmen mit unterschiedlichem Ambitionsniveau betrachtet werden. Die Beispiele illustrieren zum einen, dass die *IIA* Annahme nicht durchgehend vorausgesetzt werden kann, zum anderen, dass sich bestimmte Technologien in Gruppen zusammenfassen lassen.

Unter dieser Voraussetzung erfolgt die Berechnung der Marktanteile in Form eines *Nested-Logit*-Modells, welches zu der Gruppe der *Allgemeinen Extremwertverteilungen* gehört (vgl. McFadden 1978; Train 2003). Die Wahlalternativen werden dabei in Untermengen (Nester) gruppiert, innerhalb derer die *IIA* Annahme gilt. Eine proportionale Substitution zwischen den Nestern wird hingegen ausgeschlossen bzw. eingeschränkt. Die Gruppierung der Wärmeversorgungstechnologien erfolgt entsprechend den Vorschlägen von Kranzl et al. (2013) auf drei Ebenen (*Three-level Nested-Logit)*. Die erste Ebene unterscheidet, ob eine Technologiealternative nur aus einem primären Wärmeversorgungsystem besteht oder in Kombination mit einem solarthermischen System installiert wird. Somit werden die Menge aller Solarthermiesysteme in einem Nest und die Möglichkeit, kein Solarthermiesystem zu installieren in dem zweiten Nest auf der ersten Ebene zusammengefasst. Auf der zweiten Ebene werden die primären Wärmeversorgungssysteme nach verschiedenen Systemkategorien – Systemähnlichkeit des primären Wärmeversorgungssystems – unterschieden. Die Kategorisierung kann durch

den Nutzer des Modells in Abhängigkeit des Detaillierungsgrades der untersuchten Technologien vorgenommen werden

Abbildung 29 illustriert den Ansatz des *Nested-Logit*-Modells und zeigt die in dieser Arbeit vorgenommen Gliederung mit neun Nestern auf Ebene der Systemkategorien.

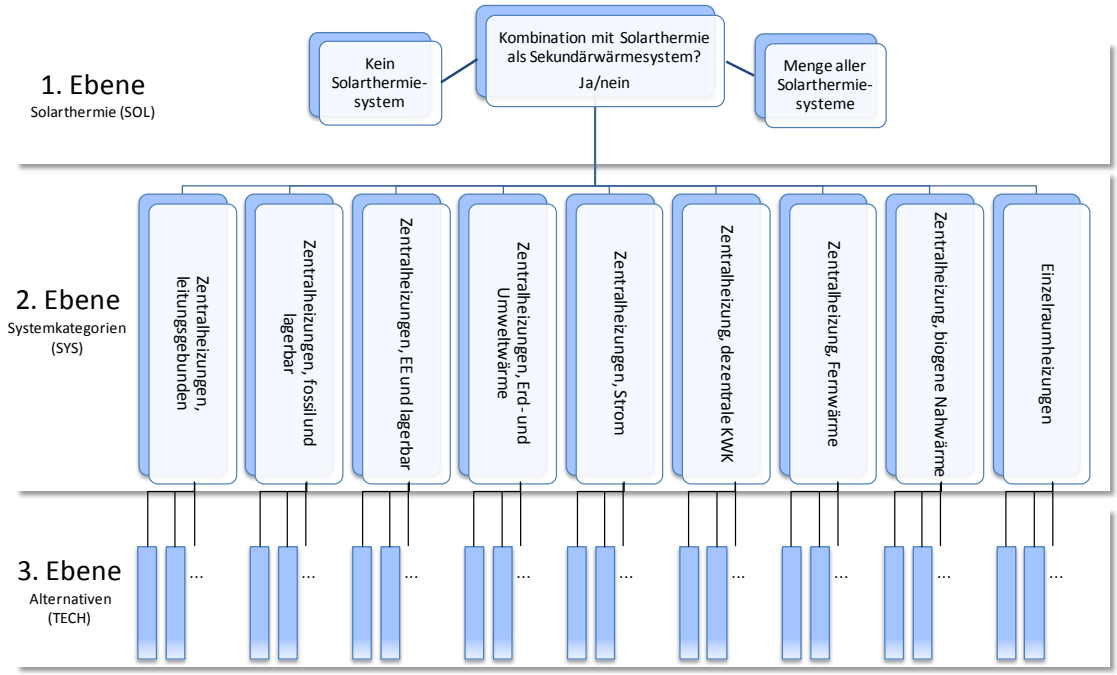


Abbildung 29: Gruppierung der Wärmeversorgungssysteme zur Berechnung der Marktanteile mittels des Nested-Logit-Modells

Die Wahlwahrscheinlichkeit einer Alternative resultiert im *Nested-Logit*-Modell aus dem Produkt der bedingten Wahrscheinlichkeiten der drei Ebenen (vgl. Gil-moltó and Hole 2003), wodurch sich die Komplexität in der Berechnung und ebenso in der Darstellung erhöht.

$$ms_i = P_{i|k(m)} \cdot P_{k|m} \cdot P_m \qquad (39)$$

$$\forall\, i \in TECH_k |\, k \in SYS_m\, , m \in SOL$$

Die resultierende Verteilungsfunktion beinhaltet im Vergleich zu der oben dargestellten *multinominalen Logit*-Funktion zusätzliche Summenterme für jede Nestebene und Parameter ($\sigma^{sys}, \sigma^{sol}$), die den Grad der Ähnlichkeit der Technologiealternativen bzw. das Maß für die proportionale Substituierung innerhalb eines Nestes ausdrücken. Der besseren Übersichtlichkeit halber wird die mathematische Formulierung der Markanteilsbe-

rechnung im Folgenden für den Fall dargestellt, dass nur eine Investoreninstanz und ein Referenzgebäudesegment betrachtet werden, womit die entsprechenden Indizes wegfallen. Im Modell erfolgt die Berechnung jedoch separat für jede Kombination aus Investorenagent und Referenzgebäude. Für eine Alternative *i,* die der Systemkategorie *k* zugeordnet ist und mit dem sekundären Wärmeversorgungsystem *m* kombiniert wird, ergibt sich auf Basis der wahrgenommen Nutzwerte folgender Marktanteil[64]:

$$ms_{i(k(m)} = \frac{e^{\frac{\hat{V}_i}{\sigma_k^{sys}}} \left(\sum_{j \in Tech_k} e^{\frac{\hat{V}_i}{\sigma_k}} \right)^{\frac{\sigma_k^{sys}}{\sigma_m^{sol}}-1} \cdot \left(\sum_{l \in SYS_m} \left(\sum_{j \in TECH_k} e^{\frac{\hat{V}_i}{\sigma_k}} \right)^{\frac{\sigma_l^{sys}}{\sigma_m^{sol}}} \right)^{\sigma_m^{sol}-1}}{\sum_{n \in SOL} \left(\sum_{l \in SYS_n} \left(\sum_{j \in TECH_k} e^{\frac{\hat{V}_i}{\sigma_l}} \right)^{\frac{\sigma_l^{sys}}{\sigma_m^{sol}}} \right)^{\sigma_n^{sol}-1}} \quad (40)$$

$SOL = \{Menge\ aller\ Solarsysteme,\ kein\ Solarsystem\}$

$SYS := Nester\ der\ Systemkategorien$

$TECH := Primäre\ Wärmeversorgungssysteme\ in\ den\ jeweiligen\ Systemkategorien$

$\sigma^{sys}, \sigma^{sol} \in \{\mathbb{R}^+ \leq 1\}$

Die beiden σ-Parameter werden durch die Standardabweichung der wahrgenommenen Nutzwerte mit Bezug auf den gewichteten Durchschnittsnutzwert operationalisiert.

5.5.4 Modellierung von Politikinstrumenten

Um die Wirkung der Politikinstrumente auf die Investitionsaktivität in Energieeffizienzmaßnahmen und Wärmeversorgungssysteme zu untersuchen, werden diese explizit im Modell abgebildet. Aufbauend auf den bereits existierenden Möglichkeiten zur Definition finanzieller Anreize und Mindeststandards in der ursprünglichen Version des Modells (Kranzl et al. 2013) erfolgt in der Erweiterung im Rahmen dieser Arbeit eine integrale Modellierung von Politikinstrumenten und Investoren, die eine akteursspezifsche Untersuchung der Wirkungen der Instrumente ermöglichen sollen (Abbildung 30).

---

[64] Für die mathematische Beweisführung und Konsistenztests des Drei-Ebenen-*Nested-Logit*-Modells sei auf McFadden (1978) oder Gil-moltó und Hole (2003) verwiesen.

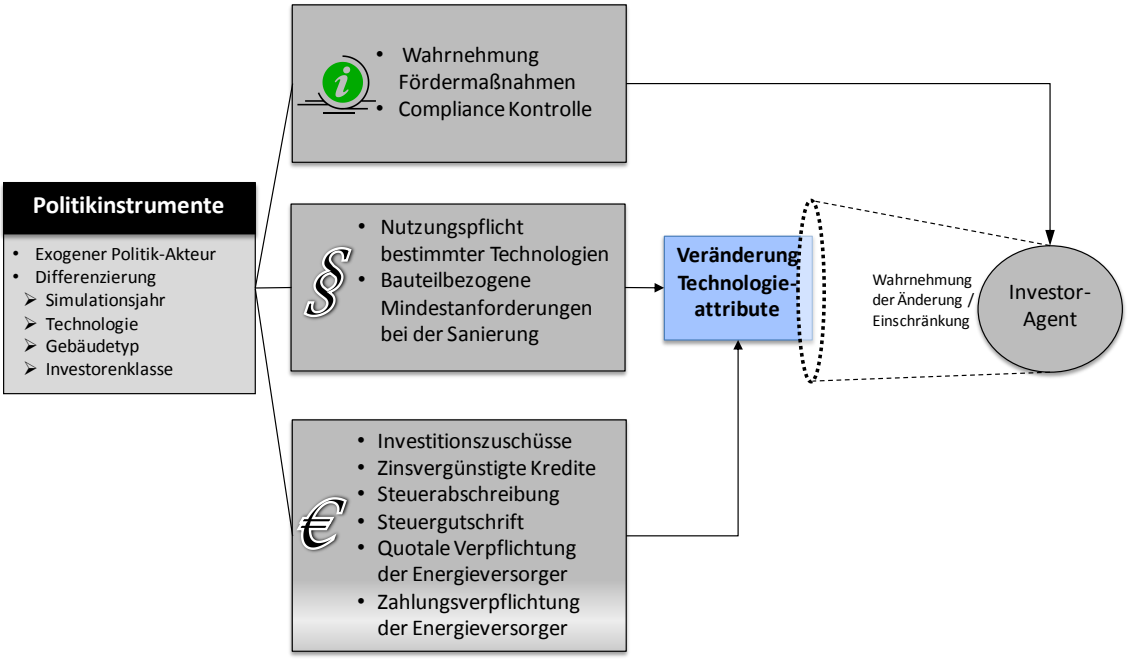


Abbildung 30: Schematische Darstellung der Modellierung von Politikinstrumenten in *Invert-Agents*

Die Politikinstrumente und deren Ausgestaltung werden zunächst aus Sicht eines Politik-Akteurs für jedes Simulationsjahr exogen definiert. Dabei werden Förder- und Anforderungsbedingungen nach den adressierten Technologien und Maßnahmen sowie den Adressaten – Investorenklassen und Gebäudetypen – differenziert. Ordnungsrechtliche und finanzielle Fördermaßnahmen verändern die Attribute der Technologiealternativen oder schränken die Wahlmöglichkeiten durch Nutzungspflichten oder Mindestanforderungen ein. In Abhängigkeit der definierten Investoragenten werden diese Veränderungen oder Einschränkungen bei der Investitionsentscheidung berücksichtigt. Ein Investitionszuschuss beispielsweise verändert die relative Vorteilhaftigkeit einer Technologie hinsichtlich des Attributes Investitionen, wobei dies nicht zwangsläufig der wahrgenommenen Attributausprägung eines Investorenagenten entspricht. Informatorische Maßnahmen wiederum wirken indirekt auf die Attribute der Wahlmöglichkeiten, indem die investorenspezifische Wahrnehmung verändert wird (vgl. 5.5.1).

Finanzielle Förderinstrumente aus Mitteln des Staates

Zur Abbildung finanzieller Förderinstrumente werden im Modell folgende Parameter für jedes Simulationsjahr definiert:

- Förderhöhe als Prozentsatz der Investitionen (s)
- Mindestauszahlung ($\hat{s}$)

- Jährliches Gesamtbudget des Instrumentes (*B*)

Die Berücksichtigung eines Investitionszuschusses in den entsprechenden Entscheidungskriterien eines Investorenagenten wird über die *Awaress_subsidies* Variable (*asub)* definiert (vgl. 5.5.1). Die wahrgenommenen Investitionen werden im Modell folgendermaßen ermittelt.

$$I_{j,bu,t,in}^{tot} = I_{j,bu,t}^{tot} - \left(asub_{in} \cdot \max\left(s_{j,bu,t} \cdot I_{j,bu,t}^{tot}, \hat{s}_{j,bu}\right)\right),\ asub_{in} \in \{0,1\} \qquad (41)$$

Die Überprüfung, ob das Gesamtbudget des Förderinstrumentes überschritten wurde, kann erst erfolgen, wenn die Simulation der Investitionsentscheidung und die daraus resultierenden Installationen der geförderten Technologien in dem jeweiligen Simulationsjahr ermittelt worden sind. Sofern das definierte Budget überschritten wurde, wird die Investitionsentscheidung erneut für einen Teil der Gebäude ohne finanzielle Förderung simuliert. Dazu wird die Anzahl der erneut zu berechnenden Gebäude jedes Referenzgebäudesegments solange erhöht, bis die Budgetgrenze nicht mehr überschritten wird. Das Gesamtbudget eines jeden Simulationsjahres wird dynamisch ermittelt und setzt sich aus dem exogen definierten Budget für das jeweilige Jahr sowie dem gegebenenfalls nicht abgerufenen Förderbudget aus dem Vorjahr zusammen.

Bei der Abbildung zinsvergünstigter Kredite wird der ökonomische Vorteil, welcher sich aus dem Zinsvorteil gegenüber dem Marktzins ergibt, in Form eines Zuschusses exogen definiert. Die Wahrnehmung des Instrumentes durch die Investorenagenten wird jedoch anders als bei einem reinen Investitionszuschuss modelliert, da es trotz ähnlicher ökonomischer Wirkung der Aufnahme von Fremdkapital bedarf. Wie bereits in 5.5.1 eingeführt, wird für jede Investoreninstanz durch die *Risk_aversion*-Variable definiert, ob ein Investorenagent eine Förderung auf Basis zinsvergünstigter Kredite bei der Investitionsentscheidung berücksichtigt.

Neben Investitionszuschüssen und Krediten wird auch die Möglichkeit implementiert, Steuerabschreibungen für Energieeffizienzmaßnahmen in unterschiedlicher Ausgestaltung (vgl. 3.4.4) zu definieren. Grundsätzlich lassen sich zwei steuerliche Förderinstrumente modellieren: eine einkommensabhängige Abschreibung und eine einkommensunabhängige Steuergutschrift. Die Modellierung der Steuerabschreibung erfordert allerdings eine Differenzierung der Investoreninstanzen anhand des Einkommens und des Einkommenssteuersatzes, welche als Eingangsdaten definiert werden. Die Ausgestaltungsparameter des Instrumentes werden spezifisch für jeden Investorenagenten definiert:

- Steuerlich abzugsfähiger Anteil der Investitionen
- Dauer der Steuerabschreibung

- (Einkommenssteuersatz)
- (Höhe des Einkommens)

Haushaltsunabhängige Förderung durch quotale Verpflichtung von Energieversorgern/Inverkehrbringer fossiler Brennstoffe

Die in Abschnitt 3.4.2 beschriebenen neuen Konzepte zur haushaltsunabhängigen Förderung von EE-Wärme werden ebenfalls als Politikinstrumente im Modell abgebildet. Die Wirkungszusammenhänge und die modelltechnische Umsetzung werden zunächst für das *Portfoliomodell* als quotales Verpflichtungssystem dargestellt.

Dabei werden durch die verpflichteten Akteure Prämien an EE-Anlagenbetreiber (Gebäudeeigentümer) ausgezahlt, die zur Quotenerfüllung herangezogen werden. Diese könnten auch als Kauf von EE-Wärmebescheinigungen oder entsprechenden Zertifikaten interpretiert werden, die aus Sicht der Investorenagenten wie ein Investitionszuschuss wirken. Die Verpflichteten reagieren darauf, in welchem Ausmaß die Quote erfüllt wird durch dynamische Anpassung der Prämienzahlungen, die modellendogen ermittelt wird. Die ausgezahlten Zuschüsse stellen für die Verpflichteten Kosten dar, welche auf die fossilen Brennstoffpreise umgelegt werden. Zur Modellierung des Förderinstrumentes werden folgende Parameter exogen definiert:

- Quotenhöhe: Diese definiert die jährliche durch quotenrelevante Neuinstallation zu erreichende bilanzielle EE-Wärme-Endenergie als Anteil der gesamten Endenergie der Wärmebereitstellung
- Quotenfaktoren für EE-Energieträger, die bei der Quotenerfüllung angerechnet werden
- Umfang der Akteure, auf deren fossile Brennstoffpreise die Kosten umgelegt werden (z. B. Ausnahme für gewerbliche Akteure)
- Verpflichtete Akteure (Gasversorger, Heizöllieferanten etc.)
- Spezifische Strafzahlung bei Nicht-Erfüllung der Quote

Abbildung 31 stellt schematisch die modelltechnische Umsetzung des Politikinstruments und den Ablauf der Berechnung für ein Simulationsjahr dar. Das Ziel der Verpflichteten ist es, die Quote zu möglichst geringen Kosten zu erreichen. Zunächst wird der Initialpreis für ein EE-Wärme-Zertifikat auf Basis des Abstandes der spezifischen Wärmebereitstellungskosten fossiler Technologien und den EE-Technologien mit den geringsten Wärmebereitstellungskosten pro erneuerbare Nutzenergie ermittelt. In Abhängigkeit der Ausgestaltung des Politikinstrumentes werden dabei mögliche technologiespezifische Quotenfaktoren berücksichtigt. Die damit gewährten Zuschüsse für die einzelnen Technologien ergeben sich durch Multiplikation mit der quotenrelevanten

EE-Wärmebereitstellung. Nach der Simulation der Investitionsentscheidung wird überprüft, ob mit den gewährten Zuschüssen eine ausreichende Menge an quotenrelevanten Neuinstallationen induziert wurde. Wird die Quote nicht erfüllt oder übererfüllt, wird im Modell der Preis für die EE-Wärme-Zertifikate iterativ angepasst, womit sich die gewährten Zuschüsse erhöhen bzw. reduzieren.

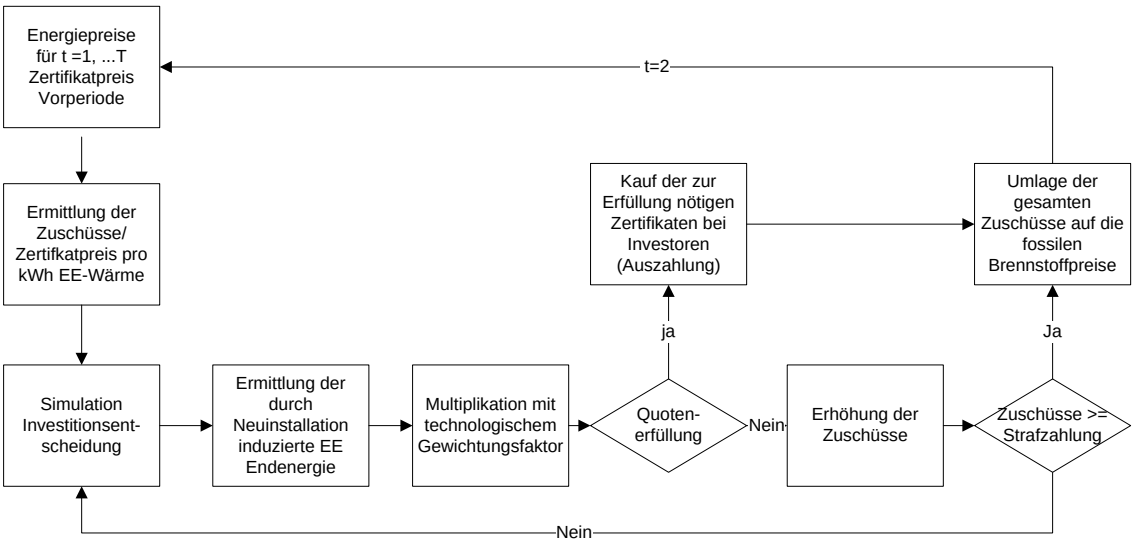


Abbildung 31: Modelltechnische Umsetzung der haushaltsunabhängigen Förderung des Portfoliomodells

In jedem Iterationsschritt wird dabei überprüft, ob eine weitere Preiserhöhung die spezifischen Strafzahlungen überschreitet. Es erfolgt eine erneute Simulation der Investitionsentscheidung mit den geänderten Zuschüssen, welche gegebenenfalls die Installation weiterer erneuerbarer Wärmeversorgungssysteme stimulieren. Der Prozess wird wiederholt, bis die Quote erreicht wird oder bis die Kosten einer weiteren Erhöhung des Zertifikatspreises die Strafzahlung übersteigt. Innerhalb eines Simulationsjahres kann der Preis zudem maximal fünf Mal angepasst werden. Diese zur Quotenerfüllung anfallenden Kosten (Summe der Zuschüsse) werden auf die Energieträger, die durch die verpflichteten Akteure verkauft werden, anteilig auf die Energiepreise der nächsten Periode umgelegt. Der am Ende einer Periode resultierende Zertifikatspreis wird ebenfalls in die nächste Periode weitergegeben.

Haushaltsunabhängige Förderung durch Zahlungsverpflichtung von Energieversorgern/Inverkehrbringer fossiler Brennstoffe

Das Prämienmodell ist in der modelltechnischen Implementierung weniger komplex, da es keine endogene Anpassung der Zuschüsse erfordert. Der implementierte Wirkungsmechanismus aus der Sicht der Investorenagenten entspricht einem Investitions-

zuschuss ohne Budgetbeschränkung. Die spezifische Förderhöhe wird für jedes Simulationsjahr exogen durch den Politikakteur vorgegeben. Die Gesamtsumme der gewährten Zuschüsse wird auf die Endverbraucherpreise der fossilen Brennstoffe umgelegt, wodurch wie im oben dargestellten Mechanismus der quotalen Verpflichtung eine dynamische – endogene – Modellierung der Energiepreise erfolgt.

Nutzungspflicht für EE-Wärme

Wie bereits in Abschnitt 3.4.1 diskutiert, existieren unterschiedliche Ausgestaltungsvarianten einer Nutzungspflicht für erneuerbare Wärme. Um in der quantitativen Analyse die Wirkung der verschiedenen Varianten untersuchen zu können, sind im Modell die relevanten Designparameter als exogen zu definierten Variablen implementiert (vgl. Tabelle 6). Als Auslösetatbestand kann entweder der Bau eines neuen Gebäudes, der Tausch des Wärmeversorgungssystems im bestehenden Gebäude oder die Renovierung des Gebäudes eingestellt werden. Die Mindestnutzungsanteile werden technologiespezifisch definiert. Zudem wird festgelegt, ob neben den primären Erfüllungstatbeständen (EE-Nutzung) auch als Ersatzmaßnahme eine verbesserte Dämmung des Gebäudes zulässig ist oder eine Strafzahlung abzuführen ist. Beim Anwendungsbereich kann zwischen unterschiedlichen Gebäudekategorien unterschieden werden. Aus Sicht der Investorenagenten stellt der Wirkungsmechanismus des Instrumentes eine Einschränkung der zur Auswahl stehenden Optionen dar. Für jede Technologieoption in jedem Referenzgebäudesegment wird ermittelt, inwieweit die Nutzungspflicht unter Berücksichtigung der technologiespezifischen Mindestanteile erreicht wird:

$$\Delta q_{j,bu}^{EE} = \max\left(0, \breve{q}_{j.bu,t}^{EE} - \frac{Q_{j,bu,t}^{EE}}{Q_{j,bu,t}^{End}}\right) \tag{42}$$

$\Delta q_{j,bu}^{EE}$ *Anteil der Nutzungspflichterfüllung durch Technologie j*

$\breve{q}_{bu,t}^{EE}$ *EE-Mindestanteil*

$Q_{j,bu,t}^{EE}$ *EE-Wärmebereitstellung*

Es wird unterstellt, dass wie im *EEWärmeG* eine Kombination von Ersatzmaßahmen und EE möglich ist. Sofern die Ersatzmaßnahme der verbesserten Wärmedämmung bei der Simulation zugelassen ist, wird ermittelt, inwieweit die Anforderung – Ziel-Endenergiebedarf – durch den derzeitigen Stand des Gebäudes bereits erfüllt ist oder ob zusätzliche Investitionen erforderlich wären. Die mit der Ersatzmaßnahme verbun-

denen Energiekosteneinsparungen werden entsprechend der investorspezifischen Energiekostenkalkulation (vgl. 5.5.1) bei der Investitionsentscheidung berücksichtigt.

$$\Delta q_{bu}^{Eff} = \max\left(0, \frac{Q_{bu}^{End} - Q_{bu}^{Eff}}{Q_{bu}^{End}}\right) \tag{43}$$

$\Delta q_{,bu}^{Eff}$ *Anteil der benötigten Energieeinsparungen durch Ersatzmaßnahmen am Endenergiebedarf von Gebäude bu*

Daraus resultieren folgende Änderungen der Energiekosten und Investitionen der Technologieoptionen, die keine oder nur eine teilweise Erfüllung der Nutzungspflicht erreichen.

$$c_{j,bu,in,t}^{EE-Obl} = c_{j,bu,in,t} \cdot (1 - \Delta q_{j,bu}^{Eff} \cdot \Delta q_{j,bu}^{EE}) \tag{44}$$

$$I_{j,bu,t,in}^{tot,use} = I_{j,bu,t,in}^{tot,hs} + I_{bu,t}^{Eff} \cdot \Delta q_{j,bu}^{EE} \cdot \Delta q_{j,bu}^{Eff} \tag{45}$$

Die Ausgestaltungsvariante mit Strafzahlung erfolgt analog, mit der Ausnahme, dass keine Energieeinsparungen realisiert werden, sofern die primäre Nutzungspflicht nicht erfüllt wird.

Mindestanforderung bei der Sanierung der Gebäudehülle

Zur Modellierung eines ordnungsrechtlichen Instrumentes, wie es die Energieeinsparverordnung in Deutschland darstellt (vgl. 3.3.4), werden Mindestanforderungen in Form von bauteilspezifischen U-Werten im Modell definiert.

Bei der Simulation der Investitionsentscheidung in Energieeffizienzmaßnahmen hat der Investorenagent die Auswahl zwischen Maßnahmen, die diese Anforderung erfüllen oder übererfüllen und Maßnahmen, die die Anforderungen nicht erfüllen, was als einfache Instandsetzung im Modell implementiert ist. Die Berücksichtigung dieser Anforderung bei der Simulation der Investitionsentscheidung hängt vom Informationsgrad (*Information awareness)* des jeweiligen Investorenagenten ab. Die Einhaltung oder das Wissen über dieses ordnungsrechtliche Instrument schränkt somit die zur Wahl stehenden Alternativen ein. Für den „nicht informierten“ Anteil innerhalb einer Investoreninstanz werden die Alternativen wiederum nicht eingeschränkt.

5.6 Ermittlung der Eingangsdaten für die Modellsimulation

Nach der Darstellung der Methodik der Modellsimulation werden im Folgenden die verwendeten Eingangsdaten dargestellt. Die Parameter können teilweise aus vorhan-

denen Quellen direkt übernommen werden, teilweise ist jedoch auch eine komplexere Ableitung bzw. Berechnung erforderlich. Zur Ermittlung der gebäudespezifischen Investitionen in Energieeffizienzmaßnahmen wird ein eigenes Berechnungsmodell entwickelt, was dem der eigentlichen Modellsimulation vorgelagert ist. Das Berechnungsmodell wird in Abschnitt 5.6.5 beschrieben.

5.6.1 Gebäudetypologische Bestimmung der Referenzgebäudesegmente

Datengrundlage zur Aufstellung der Referenzgebäudesegmente bilden die Untersuchung „Datenbasis Gebäudebestand – Datenerhebung zur energetischen Qualität und zu den Modernisierungstrends im deutschen Wohngebäudebestand“ (Diefenbach et al. 2010) und die „Deutsche Gebäudetypologie“ (Diefenbach and Born 2007; IWU 2003) des *Instituts Wohnen und Umwelt (IWU)* sowie für den Nichtwohngebäudebereich die Studien „Energieverbrauch des Sektors Gewerbe Handel Dienstleistung (GHD) in Deutschland für die Jahre 2007 bis 2010“ (Schlomann et al. 2011), „Typologie und Bestand beheizter Nichtwohngebäude in Deutschland“ (Dirich et al. 2011) und eigene Untersuchungen zum Bestand öffentlicher Gebäude (Bürger et al. 2010).

Abbildung 32 zeigt schematisch die gebäudetypologische Ableitung, die den Gebäudebestand in Deutschland in 4559 Referenzgebäudesegmente für das Startjahr der Simulation 2008 unterscheidet.

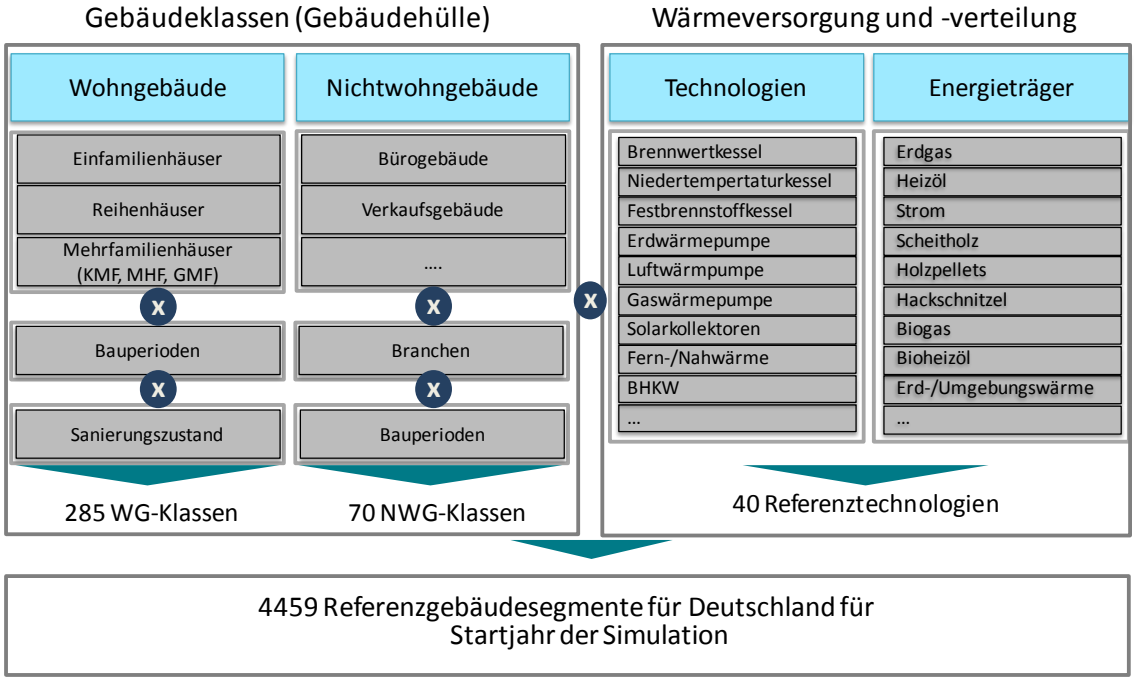


Abbildung 32: Definition der Referenzgebäudesegmente für Deutschland

Gebäudeklassen für die Wohngebäudebereich

Für den Bereich der Wohngebäude stellt die „Deutsche Gebäudetypologie“ Referenzgebäudeklassen gegliedert nach Erbauungsjahr und Gebäudetypen zur Verfügung, die durch geometrische und bauphysikalische Eigenschaften im Erbauungszustand beschrieben werden. Die „Datenbasis Gebäudebestand“ liefert eine umfangreiche Primärdatenerhebung und Bestandshochrechnung zu nachträglich durchgeführten energetischen Sanierungen sowie den eingesetzten Technologien zur Wärme- und Kälteversorgung in den einzelnen Gebäudeklassen. Die Daten werden über automatisierte Abfragen aus der vom *IWU* bereitgestellten Datenbank abgefragt; mit dem Ziel, eine detaillierte Gebäudetypologie der derzeitigen energetischen Qualität der Wohngebäude und der installierten Wärmeversorgungssysteme zu ermitteln[65]. Eine detaillierte Beschreibung des Datensatzes und der möglichen Datenabfragen sind in Diefenbach et al.(2011) dokumentiert.

[65] Die Erstellung und Durchführung der Datenbankabfragen mit dem Statistikprogramm *R* (R Development Core Team 2013) erfolgt in Zusammenarbeit mit dem Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme im Rahmen des durch das Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU) beauftragten Forschungsprojektes „Erstellung einer Integrierten Wärme- und Kältestrategie“ (vgl. Dengler et al. 2011).

Die daraus ermittelten Gebäudeklassen gliedern die Wohngebäude nach Gebäudetyp, Erbauungszeitraum und der nachträglichen Sanierung einzelner oder mehrerer Gebäudekomponenten (Tabelle 11).

Tabelle 11: Gliederungssystematik für die Gebäudeklassen

Gebäudekategorie		Baualtersklassen	Sanierungsklassen
EZFH:	Freistehende Ein- und Zweifamilienhäuser	Bis 1918	F: Fenster
		1919 - 1948	FD: Fenster und Dach
RH:	Doppel- und Reihenhaus	1949 - 1957	FDW: Fenster, Dach, Außenwand
		1958 – 1968	FDWK: Fenster, Dach, Wand Kellerdecke
KMFH:	Kleines Mehrfamilienhaus	1969 – 1978	
		1979 – 1983	O: Keine Sanierung
MMFH	Mittleres Mehrfamilienhaus	1984 – 1994	
		1995 – 2001	
GMFH	Großes Mehrfamilienhaus	2002 – 2004	
		2005	
		2006	
		2007	
		2008	
		2009	

Eine im Modell definierte Gebäudeklasse setzt sich somit aus der Kombination des Gebäudetyps, der Baualtersklasse und der Art der nachträglich erfolgten Sanierungen (Dach, Fenster, Außenwand, Keller, keine) zusammen. Um die hohe Anzahl an möglichen Permutationen vor der Hintergrund der Laufzeit des Modells zu reduzieren, werden die nachträglich erfolgten Sanierungsmaßnahmen entsprechend ihrer Häufigkeit innerhalb einer Baualtersklasse in Sanierungsklassen zusammengefasst. Die U-Werte der Gebäudekomponenten für die jeweilige Klasse werden auf Grundlage der U-Werte im Erbauungszustand – aus der „Deutschen Gebäudetypologie“ – sowie den aus den Datenbankabfragen ermittelten sanierter bzw. nachträglich gedämmten Gebäudekomponenten in den jeweiligen Baualtersklassen ermittelt. Maßgeblich dafür ist die durchschnittliche Dämmdicke (vgl. Formel (53)). bzw. bei Fenster der jeweilige Standard zum Zeitpunkt des Austausches, die ebenfalls aus den Datenbank gewonnen werden. Eine detaillierte Darstellung der resultierenden U-Werte nach Referenzgebäudeklasse ist im Anhang dieser Arbeit dargestellt.

Gebäudeklassen für den Nichtwohngebäudebereich

Die Einteilung der Nichtwohngebäude orientiert sich an der von Schlomann et al. (2011) aufgestellten Typologie, die auf der Hochrechnung einer repräsentativen Stichprobenbefragung unter 2000 Betrieben basiert. Die Typologie weist Flächen und spezifischen Energiebedarf nach Anwendungen in unterschiedlichen Gebäudetypen sowie GHD Subsektoren und Baualtersklassen aus. Die Typologie wird mit der Untersuchung von Bürger et al. (2010) zu Bestand und Struktur öffentlicher Gebäude kombiniert, um die für einige Politikinstrumente relevante Größe der öffentlichen Gebäude separat im Modell abbilden zu können. Tabelle 12 zeigt die für das Modell abgeleitete Einteilung der Gebäudeklassen, die sich aus einer Kombination Subsektor, Gebäudetypen und Baualtersklassen ergibt.

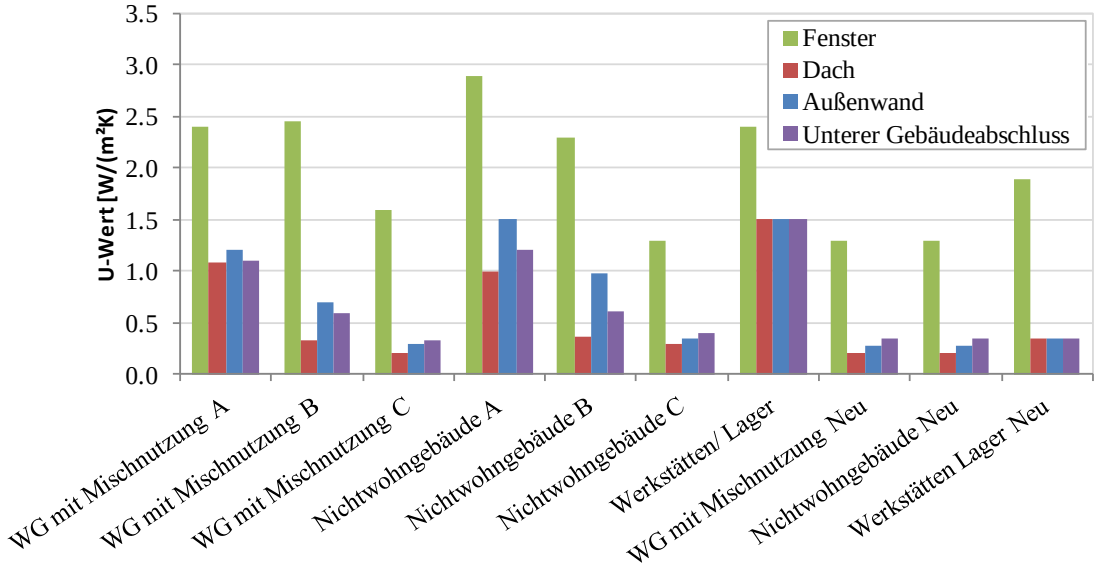
Tabelle 12: Einteilung der Gebäudeklassen für den Nichtwohngebäudebereich

Subsektoren	Gebäudetypen	Baualtersklasse
Baugewerbe	Bürogebäude	1940 bis 1976
Büroähnliche Betriebe	Lagergebäude	1977 bis 1994
Herstellungsbetriebe	Verkaufsgebäude	1995 bis 2008
KFZ-Gewerbe	Werkstattgebäude	
Handel – Verkauf	(sektorenspezifische	
Krankenhäuser öffentlich	Nutzgebäude)	
Krankenhäuser privat	Wohngebäude mit	
Schulen öffentlich	Mischnutzung	
Schulen privat	Sonstige Gebäude	
Bäder		
Beherbergung		
Gaststätten		
Org. ohne Erwerbszwecke öffentlich		
Org. ohne Erwerbszwecke privat		
Nahrungsmittelgewerbe		
Wäschereien		
Textil Bekleidung Spedition		
Militär		
Flughafen		

Quelle: (Schlomann et al. 2011)

Da in der Untersuchung keine bauphysikalischen Parameter der Nichtwohngebäudetypen erhoben werden, werden die U-Werte der Gebäudekomponenten zunächst auf Basis der in Dirich et al. (2011) beschriebenen Baualtersklassen typischen U-Werte

gesetzt und mit den spezifischen Energiebedarfswerten aus Schlomann et al. (2011) kalibriert (Abbildung 33).



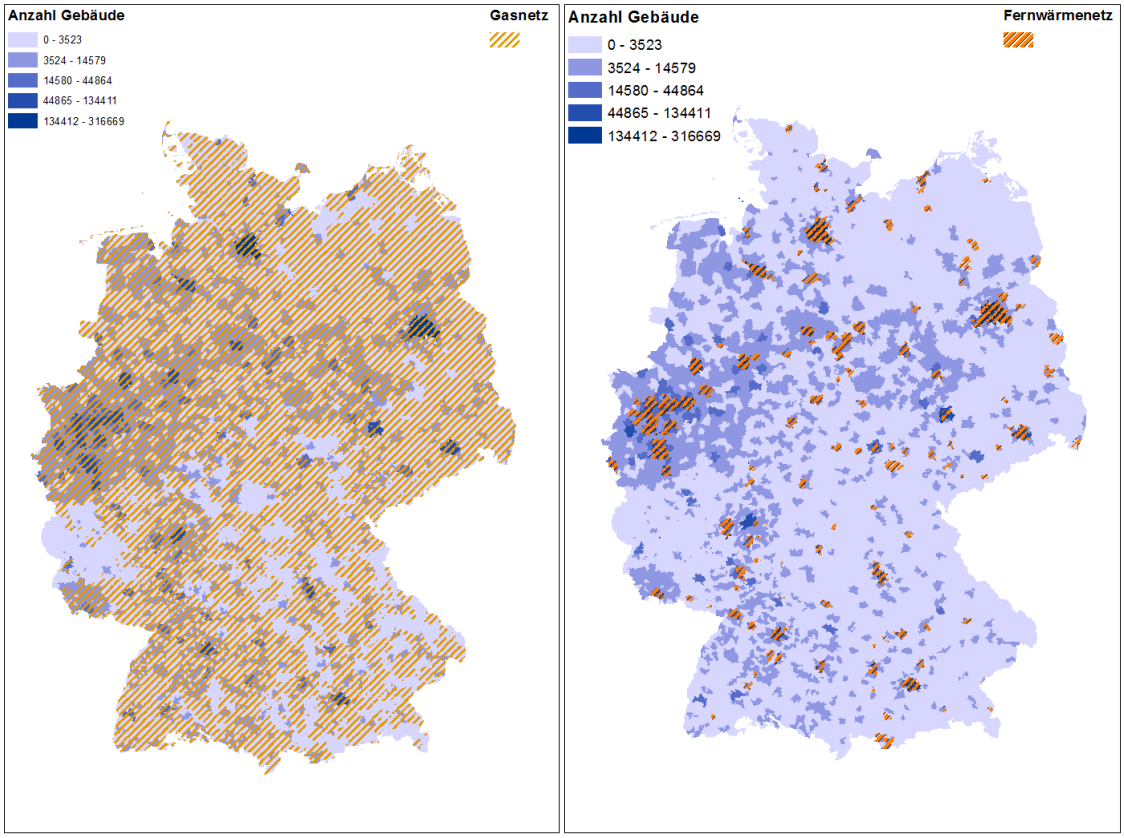
Quelle: Eigene Berechnungen auf Basis von (Dirich et al. 2011; Schlomann et al. 2011)

Abbildung 33: U-Werte der Nichtwohngebäudeklassen

5.6.2 Verfügbarkeit leitungsgebundener und biogener Energieträger

Nicht für alle Gebäude stehen leitungsgebundene Energieträger zur Verfügung, da Erdgasnetze und insbesondere wärmenetzbasierte Wärmeversorgung nicht überall verfügbar sind. Es werden daher Energieträgerregionen definiert, in denen die Verfügbarkeit der entsprechenden Energieträger eingeschränkt bzw. diese von den Investorenagenten nicht als Option gewählt werden können. Für die Zuordnung der Gebäude auf die Regionen werden Daten zum Gebäudebestand auf Gemeindeebene differenziert nach Gebäudekategorien (StaBuA 2013d) mit Informationen zur Erdgas- und Fernwärmenetzverfügbarkeit (AGFW 2011; EnergieMarktDaten 2011) in einer GIS-Analyse verschnitten.

Abbildung 34 zeigt die resultierende regionale Verfügbarkeit des Erdgas- und Fernwärmenetzes und die darin enthaltenden Gebäude. Grundlage für die Zuordnung ist die Anzahl der Gebäude, die in Gemeinden bzw. Postleitzahlregionen liegen, die derzeit über eine entsprechende Infrastruktur verfügen. Somit wird für die Szenarioanalyse bis zum Jahr 2020 unterstellt, dass nur eine Verdichtung bzw. Ausweitung der vorhandenen Netze in den jeweiligen Regionen stattfinden kann.



Quelle: GIS-Analyse basierend auf Daten von (AGFW 2011; EnergieMarktDaten 2011; StaBuA 2013d)

Abbildung 34: Regionale Verfügbarkeit von Erdgas- und Fernwärmenetz

5.6.3 Definition der Investorenagenten

Die Definition der Investorenagenten für die Modellsimulation stützt sich auf aktuelle Literatur zu Akteuren im deutschen Gebäudebestand (vgl. 2.3.2). Eine eigene empirische Erhebung zu Investitionskalkülen und Wahrnehmungen unterschiedlicher Investorentypen wird im Rahmen dieser Arbeit nicht durchgeführt. Wie bereits in Kapitel 2.3.2 dargestellt, sind insbesondere für den Wohngebäudebereich Studien und empirische Untersuchungen zu Investitionsprozessen, Handlungsmotiven sowie Hemmnissen und fördernde Faktoren verfügbar (Bürger, Reitze, et al. 2012; Kremer 2005; Schätzl et al. 2007; Schultz et al. 2011; Stieß et al. 2010). Die daraus abgeleitete Parametrisierung der Agenten stellt eine mögliche Repräsentation der Kalküle und Wahrnehmungen der Investoren im deutschen Gebäudebestand dar, die mit entsprechender Unsicherheit behaftet ist.

Tabelle 13 stellt zunächst Anteile der Investorenklassen und –instanzen an den verschiedenen Gebäudetypen dar. Für den Bereich der Wohngebäude basieren die Antei-

le auf Diefenbach et al. (2010). Die Nichtwohngebäude werden in einer Investoreninstanz zusammengefasst. Bei den privaten Vermietern wird unterschieden, ob der Investor das jeweilige Gebäude auch selbst nutzt oder ob das gesamte Gebäude vermietet ist. Die professionelle Wohnungswirtschaft wird durch die Investoreninstanz der Wohnungsgesellschaften repräsentiert. Die selbstnutzenden Eigentümer stellen die größte Investorenklasse dar, die allerdings hinsichtlich der Ziele und Einflussgrößen bei der Investitionsentscheidung sehr heterogen ist (vgl. 2.3.2). Aus diesem Grund erfolgt im Modell eine weitere Aufteilung entsprechend der in Stieß et al. (2010) vorgenommenen Einteilung der Gebäudeeigentümer.

Tabelle 13: Anteile der im Modell definierten Investoreninstanzen an den Gebäudekategorien

Investorenklassen/-instanzen	EFH	RH	GMH	KMH	MMH	NWG
Selbstnutzende Eigentümer	80,4%	78,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
Überzeugter Energiesparer	20,1%	19,5%	0%	0%	0,0%	0,0%
Aufgeschlossener Skeptiker	23,3%	22,6%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
Unreflektierter Instandhalter	9,6%	9,4%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
Desinteressierter Unwilliger	11,3%	10,9%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
Engagierter Wohnwertoptimierer	16,1%	15,6%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
Private Vermieter	16,6%	17,4%	13,3%	63,3%	30,6%	0,0%
Selbstnutzende Vermieter	9,6 %	6,4%	0,0%	40,8%	0,0%	0,0%
Vermieter	7,0 %	11,0%	13,3%	22,6%	30,6%	0,0%
Eigentümergemeinschaften	2,7%	2,8%	35,3%	15,9%	21,2%	0,0%
Wohnungsgesellschaften	0,3%	1,9%	51,5%	20,8%	48,2%	0,0%
Eigentümer Nichtwohngebäude	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	100,0 %

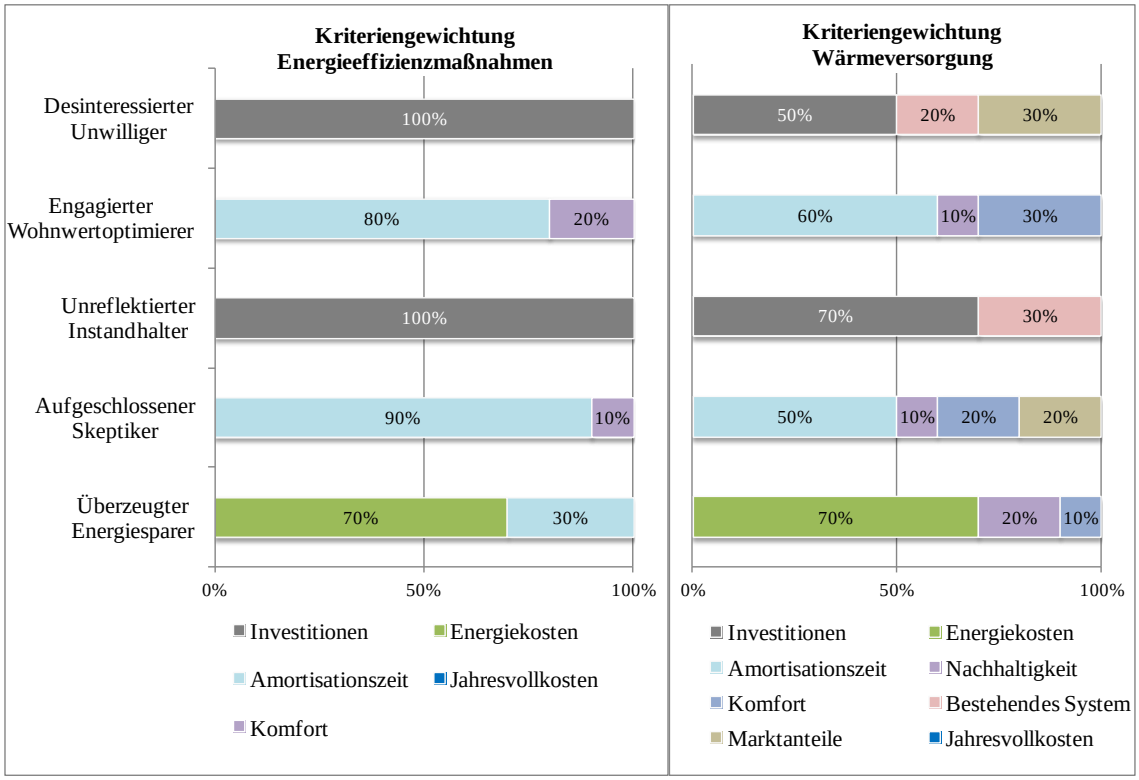
EFH = Einfamilienhaus, RH = Reihenhaus, GMH = großes Mehrfamilienhaus, KMH = kleines Mehrfamilienhaus, MMH = mittleres Mehrfamilienhaus, NWG = Nichtwohngebäude

Quelle: Eigene Berechnung auf Basis von (Diefenbach et al. 2010; Diefenbach et al. 2011; Stieß et al. 2010)

Im Folgenden werden die in der Modellsimulation unterstellten Gewichtungen der Kriterien der einzelnen Investoreninstanzen dargestellt. Für eine Beschreibung der Kriterien sei auf Abschnitt 5.5.2 verwiesen.

Kriterien bei der Investitionsentscheidung: Selbstnutzende Eigentümer

Auf Basis einer Expertenbefragung ermittelten Schulz et al. (2011), dass die Investitionen einer Energieeffizienzmaßnahme das mit Abstand wichtigste Kriterium bei der Investitionsentscheidung der selbstnutzenden Eigentümer darstellt – gefolgt von den Energiekosten an zweiter Stelle. Selbstnutzende Eigentümer werden dabei jedoch zusammengefasst als eine Gruppe betrachtet. Stieß et al. (2010) versuchen hingegen, die Heterogenität dieser Investoren durch Klassifizierung anhand von Handlungsmotiven, sozialer Situation und Lebensstilen zu erfassen (vgl. 2.3.3). Wie in Tabelle 13 dargestellt, orientiert sich die Einteilung der Investorenklasse der selbstnutzenden Eigentümer an dieser Klassifizierung in fünf Zielgruppen.



Quelle: Abgeleitet aus Klassifizierung von (Stieß et al. 2010)

Abbildung 35: Kriteriengewichtung in der Klasse der selbstnutzenden Eigentümer

Aus den in Stieß et al. (2010) ermittelten Motiven, Einstellungen und Informationsgraden der einzelnen Zielgruppen werden die Gewichtung der Kriterien sowie die Parametrisierung der investorenspezifischen Wahrnehmung im Modell abgeleitet (Abbildung 35)[66].

[66] Vgl. Kapitel 2.3.3 für die Beschreibung der Zielgruppen

Kriterien bei der Investitionsentscheidung: Private Vermieter

Für private Vermieter ist die Wirtschaftlichkeit einer Maßnahme davon abhängig, inwieweit die Kosten über eine Mieterhöhung refinanziert werden können. Ein geringes Mietniveau stellt daher ein entscheidendes Hemmnis für Energieeffizienzinvestitionen dar, da das Risiko der Refinanzierung über einen längeren Zeitraum zunimmt (Schätzl et al. 2007). In Abhängigkeit des Professionalisierungsgrades[67] sind fehlendes Eigenkapital oder geringes Finanzbudget ebenfalls ein wichtiges Hemmnis. Bei der Investitionsentscheidung werden je nach Professionalisierungsgrad der Vermieter die Kriterien Amortisationszeit und Jahresvollkosten hochgewichtet[68], wobei darin nicht die Energiekosten, sondern die Umlage der Investitionen auf die Miete einfließt (vgl. 5.5.2). Die Höhe der Investitionen wird ebenfalls berücksichtigt, womit dem Risiko der Refinanzierung und dem fehlenden Eigenkapital Rechnung getragen wird (Abbildung 36).

Kriterien bei der Investitionsentscheidung: Wohnungsgesellschaften und Eigentümer von Nichtwohngebäuden

Die *Annuität der Jahresgesamtzahlungen* als Methode der dynamischen Investitionsrechnung wird als wichtigstes Kriterium für Wohnungsgesellschaften und Eigentümer von Nichtwohngebäuden angesetzt, da für diese Investoren eine Kalkulation nach betriebswirtschaftlichen Grundsätzen unterstellt werden kann. Bei der Bewirtschaftung großer Wohnungsbestände werden jedoch auch die autonome Betriebsweise der Wärmeversorgung sowie die Reduzierung der vorhandenen Technik in den Wohnungen angestrebt, um mögliche Schäden durch Nutzer zu vermeiden und somit Instandhaltungskosten zu minimieren. Bei der Investoreninstanz der Wohnungsgesellschaften wird dies durch das Kriterium *Komfort* ebenfalls berücksichtigt (Abbildung 36).

Kriterien bei der Investitionsentscheidung: Eigentümergemeinschaften

Die Entscheidungsfindung in Eigentümergemeinschaften erfordert im Falle von Modernisierungsinvestitionen eine Zustimmung von mindestens drei Viertel der Eigentümer, während für Erhaltungsmaßnahmen[69] eine einfache Mehrheit erforderlich ist (vgl.

---

67 Schätzl et al. (2007) definieren den Professionalisierungsgrad privater Vermieter anhand der zur vermietenden Wohneinheiten, wobei die Grenze zwischen „Amateurvermietern“ und „professionellen Vermietern“ bei 15 Wohneinheiten liegt.

68 Es wird angenommen, dass die selbstnutzenden Vermieter über einen geringeren Professionalisierungsgrad verfügen und nicht über mehrere Objekte verfügen

69 Erhaltungsmaßnahmen umfassen Instandhaltungs- und Instandsetzungsmaßnahmen (vgl. 5.5.2).

2.3.3). Eine gesetzlich vorgeschriebene Rücklage ist zudem nur für Erhaltungsmaßnahmen zu bilden (vgl. WoEigG § 21 (5)). Das Kriterium *Investitionen* wird daher bei der Entscheidung in Energieeffizienzmaßnahmen am höchsten gewichtet. Um die Instandhaltungsstrategie bei der Wahl der Wärmeversorgung abzubilden, wird zudem das Kriterium *bestehendes Heizsystem* berücksichtigt (Abbildung 36).

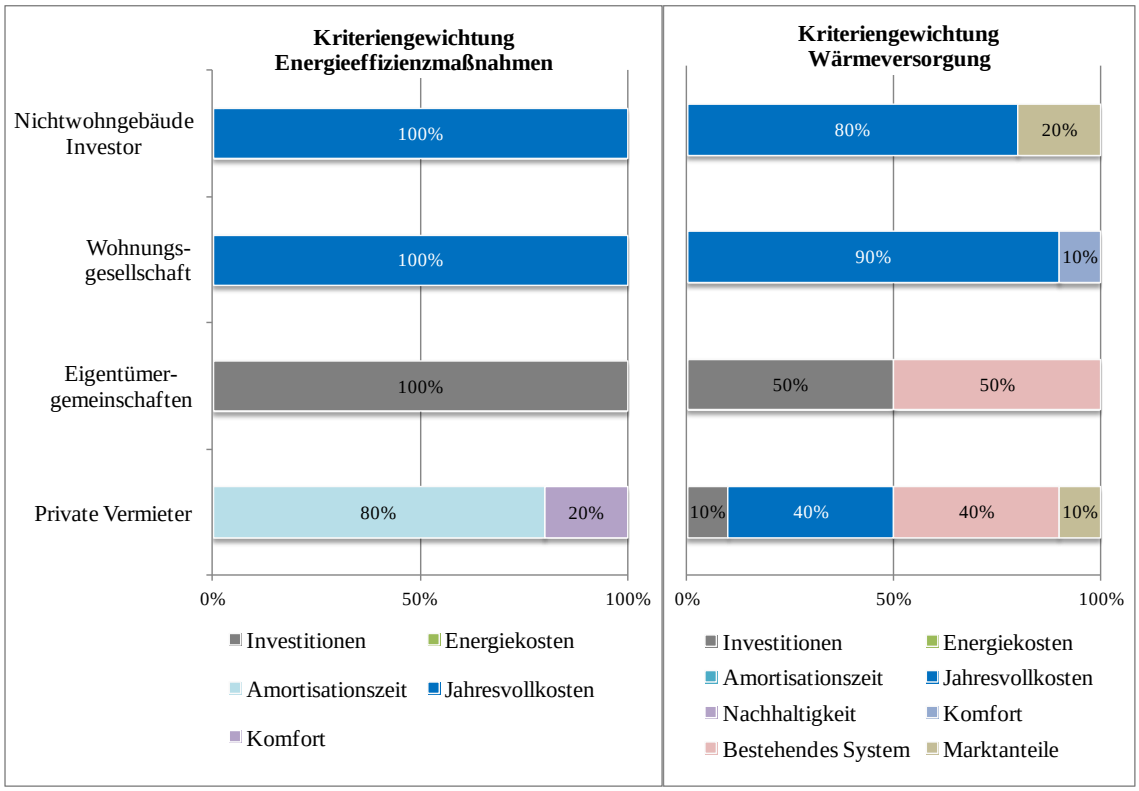


Abbildung 36: Kriteriengewichtung der Vermieter, Wohnungsgesellschaften, Eigentümergemeinschaften und Nichtwohngebäude Eigentümer

Wahrnehmung der Investoren

Tabelle 14 zeigt die Parameter der investorenspezifischen Wahrnehmung des Modells (vgl. 5.5.1). Für die Parametrisierung der Investoreninstanzen in der Klasse der selbstnutzenden Eigentümer sind die Angaben zum Umfang der genutzten Informationsquellen und Arten der Finanzierung aus Stieß et al. (2010) maßgeblich. So verwendet beispielsweise die Zielgruppe der *Überzeugten Energiesparer* unterschiedliche Informationskanäle und nutzt Energieberatungsangebote, während die Zielgruppe der *Unreflektierten Instandhalter* die Eigentümer umfasst, welche ihre Informationen vornehmlich über den Heizungsbauer beziehen (vgl. 2.3.3). Die Finanzierung von Energieeffizienzmaßnahmen über Fremdkapital stellt jedoch für beide Gruppen eine Option dar, so dass auch kreditbasierte Fördermaßnahmen berücksichtigt werden. Hinsichtlich der Kalkulation der Energiekosten wird für alle privaten Eigentümer eine Energiepreis-

wahrnehmung auf Basis der gewichteten Preise der vergangenen Perioden angenommen (vgl. 5.5.1).

Tabelle 14: Parametrisierung der investorenspezifischen Wahrnehmung

Investor	Information/ Compliance (inf_{in}):	Wahrneh. Förderung $(asub_{in})$	Risiko-avers $(risk_{in})$	Energiekosten Kalkulation $(pcacl_{in})$
Überzeugter Energiesparer	Mittel bis hoch	Ja	Nein	Gew. (t, t-1, t-2)
Aufgeschlossener Skeptiker	Mittel	Ja	Ja	Gew. (t, t-1, t-2)
Unreflektierter Instandhalter	Niedrig	Nein	Nein	Gew. (t, t-1, t-2)
Desinteressierter Unwilliger	Niedrig	Nein	Ja	Gew. (t, t-1, t-2)
Eng. Wohnwertoptimierer	Mittel	Ja	Nein	Gew. (t, t-1, t-2)
Private Vermieter	Mittel	Ja	Nein	Gew. (t, t-1, t-2)
Eigentümergemeinschaften	Niedrig	Nein	Ja	Gew. (t, t-1, t-2)
Wohnungsunternehmen	Hoch	Ja	Nein	Norm
Eigentümer Nichtwohngeb.	Mittel bis hoch	Ja	Nein	Norm

Die vorhanden Informationsdefizite über Förderprogramme und Technologien der privaten Vermieter werden in der Literatur unterschiedlich bewertet (Kremer 2005; Schätzl et al. 2007). Im Modell wird daher eine mittlere Informationswahrnehmung für diese Investoren angenommen und eine kreditbasierte Finanzierung wird nicht ausgeschlossen. Für Eigentümergemeinschaften wird die Möglichkeit einer kreditbasierten Förderung hingegen ausgeschlossen, um die bestehenden Hemmnisse für diese Akteursgruppe bei der Kreditvergabe durch die Geschäftsbanken im Modell abzubilden. Professionell agierende Gebäudeeigentümer – Wohnungsellschaften und Eigentümer von Nichtwohngebäuden – werden mit einem hohen Informationsgrad und der Möglichkeit zur Aufnahme von Krediten ausgestattet. Bei der Energiekostenberechnung wird diesen Investoren eine auf Wirtschaftlichkeitsnorm basierte Kalkulation zugrundegelegt. Diese basiert wie in Kapitel 5.5.1 eingeführt auf der angenommenen Energiepreisentwicklung über die Lebenszeit unter Berücksichtigung der Energiepreisveränderung der Vorperioden.

5.6.4 Wärmeversorgungstechnologien in der Modellsimulation

Die im Modell hinterlegten Referenztechnologien für die Wärmeversorgung decken die derzeitigen am Markt verfügbaren Technologien sowie den Bestand der in den Gebäuden installierten Technologien ab. Die im Modell hinterlegten technischen und ökonomischen Parameter basieren auf verschiedenen Studien, Verbandserhebungen und Evaluationsberichten von Förderprogrammen, die in der Metaanalyse von Dengler et al. (2011) zusammengefasst sind. Für die Beschreibung der Referenztechnologien anhand der ökonomischen Parameter sei auf Kapitel 2.2.2 verwiesen.

5.6.5 Effizienzmaßnahmen in der Modellsimulation

Die Effizienzmaßnahmen an der Gebäudehülle werden nicht als Einzelmaßnahmen abgebildet, sondern durch vier zur Wahl stehende Maßnahmenpakete im Modell implementiert, die verschiedenen energetischen Standards der Gebäudehülle entsprechen:

(1) Sanierung auf den Standard der EnEV (vgl. 3.3.4)
(2) Effizienzhausstandard *KfW 100* (vgl. 3.3.5).
(3) Effizienzhausstandard *KfW 55* (vgl. 3.3.5).
(4) Instandsetzung ohne energetische Sanierung

Der zu erreichende Standard wird über den spezifischen, auf die wärmeübertragende Gebäudefläche bezogenen Transmissionswärmekoeffizienten (ht‘) definiert (vgl. 3.3.4). Die mit den Effizienzmaßnahmenpaketen verbundenen Investitionen hängen maßgeblich vom energetischen Ausgangszustand des jeweiligen Referenzgebäudes ab. Zudem bestehen Freiheitsgrade bei der Erreichung der Standards hinsichtlich der Auswahl der zu sanierenden Gebäudekomponente und der jeweiligen Sanierungstiefe (Dicke der Dämmschicht, Fensterqualität). Aufgrund dieser Komplexität und der Relevanz der Investitionen bei der Entscheidungsfindung wird ein separates Berechnungsmodell entwickelt, welches die Investitionen für die einzelnen Referenzgebäude unter der Annahme einer kostenoptimalen Kombination der zu sanierenden Gebäudebauteile berechnet. Das Berechnungsmodell wird der Simulation vorgeschaltet, so dass bei einer Änderung der energetischen Standards in den Politikszenarien – z. B. durch eine angenommen Verschärfung der *EnEV* – die korrespondierenden Investitionen entsprechend angepasst werden.

Als Datengrundlage für die Berechnung dienen die durch Hinz (2011) ermittelten Investitionskurven für die verschiedenen Gebäudekomponenten (Außenwand, oberer Gebäudeabschluss, Kellerdecke, Fenster) in Abhängigkeit der verwendeten Dämm-

stoffdicke bzw. des U-Wertes bei Fenstern (vgl. 2.2.3: Abbildung 10). Zur Berechnung der Gesamtinvestitionen eines Effizienzmaßnahmenpaketes in den jeweiligen Referenzgebäuden wird ein ganzzahliges lineares Optimierungsproblem formuliert. Für jede mögliche Sanierungsausprägung in Form von Dämmstoffdicke und Fensterqualität der einzelnen Gebäudekomponenten wird jeweils eine binäre Entscheidungsvariable benötigt (Tabelle 15). Bei den opaken Bauteilen werden Dämmstoffdicken zwischen 6 und 35 Zentimeter als diskrete Optionen berücksichtigt[70]; bei Fenstern ($X_{bu,j}^{WI}$) stehen Zweifach- oder Dreifachwärmeschutzverglasung zur Auswahl (Abbildung 10). Des Weiteren gibt es für jede Gebäudekomponente die Option, keine Sanierung durchzuführen – Dämmung mit null Millimetern, Fenster werden im Ausgangszustand belassen. Bei der Sanierung der Außenwand und des Daches ist zudem die Aufstellung eines Gerüstes erforderlich, welches mit zusätzlichen Ausgaben verbunden ist, die in den Gesamtinvestitionen berücksichtigt werden müssen. Daher wird neben den Entscheidungsvariablen für die Sanierungsoptionen der vier Gebäudekomponenten eine weitere Binärvariable für die Aufstellung eines Gerüstes beinbezogen[71].

Tabelle 15: Entscheidungsvariablen im Investitionsberechnungsmodell

Variable/	Typ	Einheit	Beschreibung
$X_{bu,j}^{WA}$	binär	-	Sanierungsoptionen für die Außenwand
$X_{bu,j}^{RO}$	binär	-	Sanierungsoptionen des oberen Gebäudeabschlusses (Dach, obere Geschossdecke)
$X_{bu,j}^{FL}$	binär	-	Sanierungsoptionen für die Kellerdecke
$X_{bu,j}^{WI}$	binär	-	Sanierungsoptionen für die Fenster
X_{bu}^{SC}	binär	-	Gerüst für Sanierungsoption erforderlich

Zur besseren Übersicht werden in Tabelle 16 die verwendeten Parametern im Investitionsberechnungsmodell dargestellt, bevor die Zielfunktion und die Nebenbedingungen erläutert werden.

70 Die maximalen Dämmstoffdicken variieren zwischen den Gebäudekomponenten (vgl. Hinz 2011).

71 Die Kosten zur Einrüstung des Gebäudes werden nach Hinz (2011) mit 11 Euro pro Quadratmeter Wohnfläche angesetzt.

Tabelle 16: Verwendete Parameter im Investitions-Berechnungsmodell

Parameter	Einheit	Beschreibung
a_{bu}^{WA}	m²	Fläche der Außenwände
a_{bu}^{RO}	m²	Fläche des oberen Gebäudeabschlusses
a_{bu}^{FL}	m²	Fläche der Kellerdecke
a_{bu}^{WI}	m²	Fensterfläche
a_{bu}^{w}	m²	Wohnfläche
c_j^{WA}	EUR/ m²	Spez. Investitionen der Außenwandsanierungsoption j
c_j^{RO}	EUR/ m²	Spez. Investitionen der Sanierungsoption j des ob. Gebäudeabschlusses
c_j^{FL}	EUR/ m²	Spez. Investitionen der Kellerdeckensanierungsoption j
c_j^{WI}	EUR/ m²	Spezifische Investitionen der Fenstersanierungsoption j
c^{SC}	EUR/ m²	Spezifische Kosten der Gerüstaufstellung
$u_{bu,j}^{WA}$	W/(m²K)	Resultierender U-Wert der Außenwand mit Sanierungsoption j
$u_{bu,j}^{RO}$	W/(m²K)	Resultierender U-Wert des oberen Gebäudeabschluss mit Sanierungsoption j
$u_{bu,j}^{FL}$	W/(m²K)	Resultierender U-Wert der Kellerdecke mit Sanierungsoption j
$u_{bu,j}^{WI}$	W/(m²K)	Resultierender U-Wert bei Austausch der Fenster mit Sanierungsoption j
ht_{bu}^{ref}	W/(m²K)	Zielwert des spezifischen, auf die wärmeübertragende Umfassungsfläche bezogenen Transmissionswärmekoeffizienten

Die Zielfunktion stellt eine Minimierung der Investitionen für den jeweils zu erreichenden Effizienzstandard dar. Als Parameter gehen darin die spezifischen Investitionen der möglichen Sanierungsoptionen sowie die Flächen der Gebäudekomponenten ein.

$$Min\begin{pmatrix} \sum_j a_{bu}^{WA} \cdot c_j^{WA} \cdot X_{bu,j}^{WA} + \sum_j a_{bu}^{RO} \cdot c_j^{RO} \cdot X_{bu,j}^{RO} \\ + \sum_j a_{bu}^{FL} \cdot c_j^{FL} \cdot X_{bu,j}^{FL} + \sum_j a_{bu}^{WI} \cdot c_j^{WI} \cdot X_{bu,j}^{WI} + X_{bu}^{SC} \cdot c^{SC} \cdot a_{bu}^{w} \cdot \end{pmatrix} \qquad (46)$$

Für jede Gebäudekomponente ist jeweils eine Nebenbedingung erforderlich, welche garantiert, dass pro Komponente nur eine Sanierungsoption[72] gezogen wird.

$$\sum_j X_{bu,j}^{WA} = 1; \qquad (47)$$

[72] Dies beinhaltet, wie oben dargestellt, die Option nichts zu verändern.

$$\sum_j X_{bu,j}^{RO} = 1 \tag{48}$$

$$\sum_j X_{bu,j}^{FL} = 1; \tag{49}$$

$$\sum_j X_{bu,j}^{WI} = 1 \tag{50}$$

Eine weitere Nebenbedingung wird mit der Setzung der Variable zur Einrüstung des Gebäudes aufgestellt. Dadurch wird garantiert, dass diese Ausgaben nur im Falle einer Dach- oder Außenwandsanierung anfallen.

$$\sum_j X_{bu,j}^{WA} - X_{bu}^{SC} + \sum_j X_{bu,j}^{WA} - X_{bu}^{SC} \leq 0 \tag{51}$$

Der zu erreichende Energieeffizienzstandard des Maßnahmenpaketes wird in Form des spezifischen Transmissionswärmekoeffizienten vorgegeben. Dieser wird wie in der *EnEV* in Abhängigkeit des Gebäudetyps definiert (vgl. 3.3.4). Alternativ können auch Ziel-U-Werte für die einzelnen Gebäudekomponenten vorgegeben werden, aus denen der spezifische Transmissionswärmekoeffizient ermittelt wird. Folgende Nebenbedingung garantiert, dass der Zielstandard erreicht wird.

$$\begin{aligned} &\sum_j a_{bu}^{WA} \cdot u_{bu,j}^{WA} \cdot X_{bu,j}^{WA} + \sum_j a_{bu}^{RO} \cdot u_{bu,j}^{RO} \cdot X_{bu,j}^{RO} \\ &+ \sum_j a_{bu}^{FL} \cdot u_{bu,j}^{FL} \cdot X_{bu,j}^{FL} + \sum_j a_{bu}^{WI} \cdot u_{bu,j}^{WI} \cdot X_{bu,j}^{WI} \leq ht_{bu}^{ref} \cdot a_{bu}^{Tot} \end{aligned} \tag{52}$$

Die resultierenden U-Werte der opaken Komponenten in der Nebenbedingung werden analog zum Vorgehen in 5.6.1 aus den U-Werten im Ausgangszustand und der Dämmstärke der jeweiligen Sanierungsoptionen ermittelt[73].

$$u_{bu,j}^{Opak} = \left(\frac{1}{u_{bu}^{Opak}} + \frac{d_j}{\kappa} \right)^{-1} \tag{53}$$

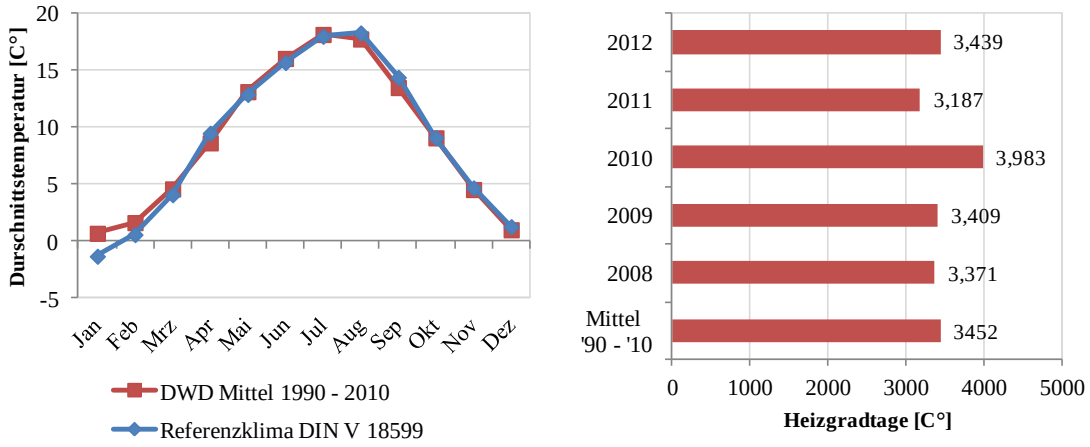
Das Berechnungsmodell wird als *Python*-Programm mit dem Optimierungspaket *Coopr-Pyomo* implementiert (Sandia National Laboratories 2013) unter Verwendung des *GLPK* Solver (Makhorin 2013). Das Modell wird so programmiert, dass die Opti-

[73] Es wird eine Wärmeleitfähigkeit (κ) des Dämmmaterials von 0,035 W/(mK) angenommen, Dies entspricht der durchschnittlichen Wärmeleitfähigkeit von Mineralfaserdämmstoffen, welche die am meisten verwendeten Dämmstoffe darstellen (Eicke-Hennig 2011).

mierung sukzessive für jedes der definierten Referenzgebäude durchgeführt wird. Die resultierenden U-Werte der Gebäudekomponenten und der spezifischen Investitionen werden im Eingangsdatenformat von *Invert/EE-Lab* und *Invert-Agents* herausgeschrieben, so dass eine flexible Anwendung des Berechnungsmodells für weitere Untersuchungen möglich ist.

5.6.6 Referenzklima und Temperaturbereinigung

Als Referenzklima werden die durchschnittlichen Monatstemperaturen im Gebietsmittel zwischen den Jahren 1990 und 2010 angesetzt (DWD 2012). Der Verglich mit dem Referenzklima der DIN V 18599-10 (2007) zeigt nur marginale Abweichungen (Abbildung 37).



Quelle: Eigene Darstellungen, (DIN V 18599-10 2011; DWD 2012; StaBuA 2012)

Abbildung 37: Referenzklima der Modellsimulation und Heizgradtage für Temperaturbereinigung

Das langjährige Mittel 1990 bis 2010 wird auch bei der Temperaturbereinigung des Statistischen Bundesamtes in der Umweltökonomischen Gesamtrechnung (UGR) angewendet (StaBuA 2012). Abbildung 37 zeigt die resultierenden Heizgradtage des langjährigen Mittels sowie für die Jahre 2008 bis 2012[74]. Als Norm-Innenraumtemperatur werden 20 Grad Celsius angenommen.

[74] Die Heizgradtage werden aus den durchschnittlichen Temperaturen von neun Wetterstationen ermittelt.

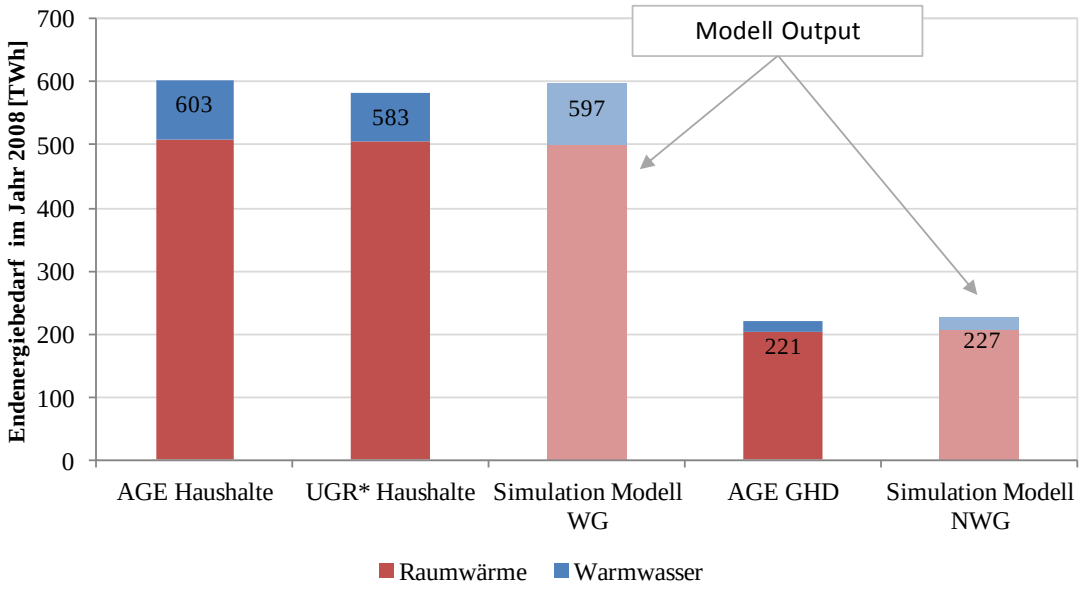
5.6.7 Kalibrierung und Abgleich der Eingangsdaten mit der Energiebilanz

Die Modellierung des Endenergiebedarfs und des Energieträgereinsatzes auf Basis der oben dargestellten Gebäudedaten wird für das Simulationsstartjahr 2008 mit der Energiestatistik verglichen und kalibriert. Die nationalen Energiestatistiken dienen dabei nicht nur als Rahmen für die Kalibrierung, sondern liefern auch zusätzliche Daten, beispielsweise zu den verwendeten Energieträgern in Nah- und Fernwärme. Das Ziel der Kalibrierung ist eine hinreichende Konsistenz zwischen der nationalen Statistik, den erhobenen *Bottom-up*-Daten zu Gebäuden und Energieträgern und den Modellergebnissen. Als zentrale Kalibrierungsparameter dienen die Servicefaktoren, welche den Anteil der beheizten Fläche in Abhängigkeit des Wärmeversorgungssystems angeben (vgl. 5.3).

Folgende nationale Energiestatistiken werden für die Kalibrierung herangezogen:

- Anwendungsbilanzen der Arbeitsgemeinschaft Energiebilanzen (AGEB et al. 2011)
- Energiebedarf des Sektors Gewerbe, Handel, Dienstleistung (GHD) in Deutschland (Schlomann et al. 2011, 2013)
- Umweltökonomische Gesamtrechnung (UGR) Teil 2: Energie (StaBuA 2013c)
- Arbeitsgemeinschaft Erneuerbaren Energien Statistik (AGEE-Stat 2012)
- Satellitenbilanz Erneuerbare Energien der Arbeitsgemeinschaft Energiebilanzen (AGEB 2010)

Der mit dem Modell abgebildete Endenergiebedarf entspricht der Endenergie für die Anwendungen Raumwärme und Warmwasser in den Sektoren Haushalte (Wohngebäude) und GHD (Nichtwohngebäude). Der Raumwärme- und Warmwasserbedarf in der Industrie und im Verkehrssektor werden nicht vom Modell abgedeckt (vgl. 6.2). Eine vollständige Übereinstimmung zwischen modellierten Hochrechnungen auf Basis von Referenzgebäuden und -technologien und der Energiestatistik, die auf erhobenen Verbrauchsdaten basiert, ist nicht zu erwarten, da Unsicherheiten hinsichtlich der realen Verteilungen vieler Parameter auf beiden Seiten besteht. Es existieren zudem Abweichungen zwischen den Statistiken. Beispielsweise bestehen Unterschiede beim Wärmeendenergiebedarf im Haushaltssektor zwischen AGEB et al. (2011) und StaBuA (2012), die sich nicht durch die Temperaturbereinigung in der *UGR* erklären lassen. Abbildung 38 vergleicht die kalibrierten Modellergebnisse mit den Energiestatistiken getrennt nach den Sektoren Haushalte und GHD.

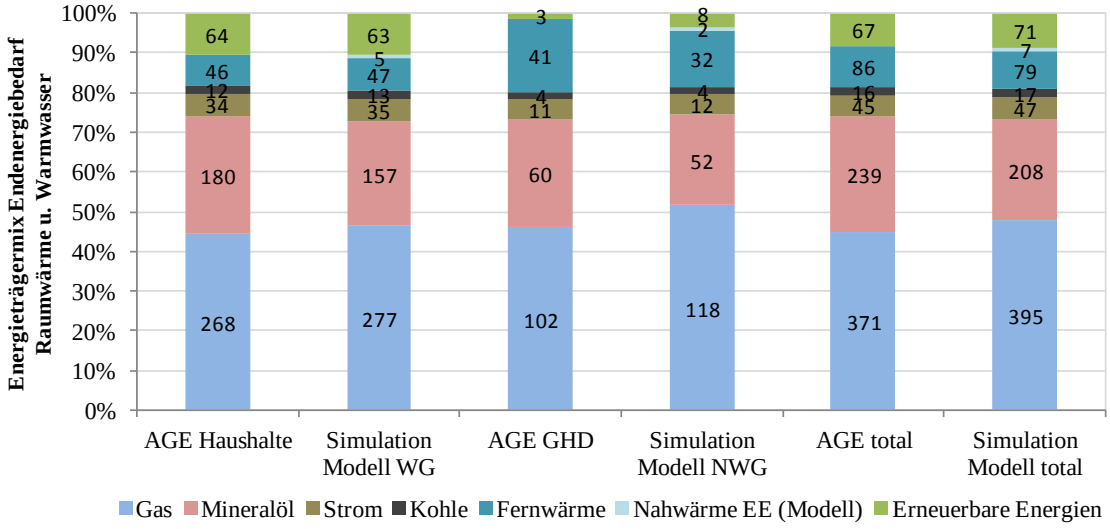


*Temperaturbereinigt;
AGE = Arbeitsgemeinschaft Energiebilanzen; UGR = Umweltökonomische Gesamtrechnung;
WG = Wohngebäude; NWG = Nichtwohngebäude;
GHD = Sektor Gewerbe, Handel; Dienstleistungen
Quelle: Eigene Berechnung, (AGEB et al. 2011; StaBuA 2013c)

Abbildung 38: Vergleich des Endenergiebedarfs nach Energiebilanz und der *Bottom-up*-Modellsimulation

In der Summe stimmt der Endenergiebedarf von AGE und Modellergebnissen mit 824 TWh im Jahr 2008 überein. Es gibt nur eine leichte Verschiebung zwischen den Sektoren, was durch eine nicht vollständig mögliche Zurechnung der Gebäude auf Sektoren zu erklären ist (z. B. Wohngebäude mit Mischnutzung).

Beim Vergleich des Energieträgereinsatzes zeigt sich ebenfalls diese unterschiedliche Zurechnung (Abbildung 39). Für den gesamten Gebäudebereich besteht jedoch eine Verschiebung zwischen Erdgas- und Mineralöleinsatz. Die wärmenetzbasierte Wärmebereitstellung, die im Modell nach Fernwärme und EE-Nahwärme gegliedert ist – stimmt hingegen mit der in den Anwendungsbilanzen ausgewiesenen Fernwärme überein.



Quelle: (AGEB et al. 2011)

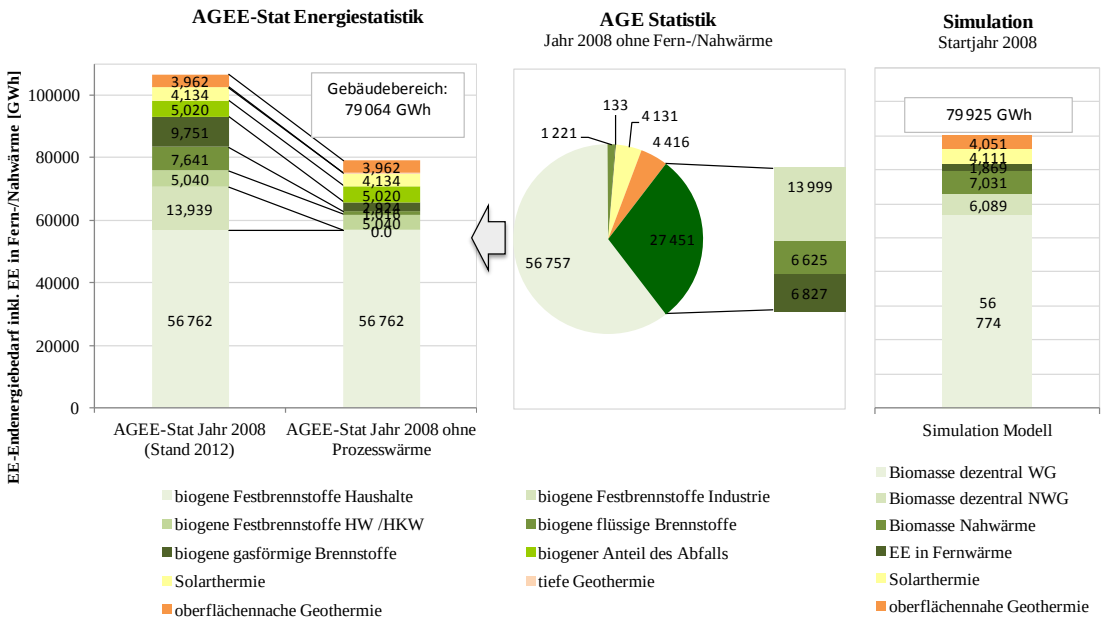
Abbildung 39: Vergleich Energieträgeraufteilung nach Energiebilanz und nach *Bottom-up*-Modellsimulation

Eine Abweichung gibt es auch zwischen der dezentral erzeugten EE-Wärmebereitstellung, die jedoch im Detail mit der nationalen EE-Statistiken der *AGEE-Stat* verglichen und kalibriert wird. Abbildung 40 gibt einen Überblick zu den Statistiken über erneubare Energien der AGEE-Stat (2012) und der AGEB (2010) sowie den kalibrierten Modellergebnissen für das Jahr 2008. Zunächst wird aus der Kombination beider Statistiken der Anteil erneuerbarer Energien abgeleitet, der dem Gebäudebereich zuzurechnen ist[75]. Die für den Gebäudebereich relevante EE-Wärme-Endenergie von rund 79,1 TWh ergibt sich durch Abzug der dem Industriesektor (Prozesswärme) zugeordneten Biomassefraktionen. Unsicherheiten in der Statistik bestehen insbesondere im Bereich der gasförmigen biogenen Brennstoffe bzw. deren für die Wärmebereitstellung genutzten Anteils über Wärmenetze (ZSW 2012)[76]. Insgesamt liegt die Abweichung zwischen Modellsimulation und Statistik bei der gesamten Biomasse bei nur 1,2 Prozent. Bei der

[75] Die *AGEE-Stat* erfasst die erneubaren Wärmebereitstellungen gegliedert nach Energieträgern, jedoch nicht oder nur teilweise nach Sektoren. Die *AGEB* wiederum gliedert nach Sektoren, weist jedoch nicht die EE-Endenergiebereitstellung durch Fern- und Nahwärme aus.

[76] Eine nachträgliche Anpassung der AGEE-Stat-Zahlen von Juli 2013 konnte bei der Kalibrierung nicht mehr berücksichtigt werden (vgl. AGEE-Stat 2013). Dabei sind insbesondere gasförmige und flüssige biogene Brennstoffe nach unten korrigiert worden, welche vermutlich zum großen Teil ohnehin dem Industriebereich zuzurechnen sind (AGEB 2010).

oberflächennahen Geothermie[77] liegt sie bei 2,2 Prozent, für Solarthermie bei 0,6 Prozent. Dadurch hat die Kalibrierung eine hinreichende Genauigkeit nicht nur hinsichtlich des gesamten Wärmeendenergiebedarfs im Gebäudebereich erreicht, sondern auch bei den erneuerbaren Energien.



Quelle: (AGEB 2010; AGEE-Stat 2012)

Abbildung 40: Vergleich erneuerbare Energien Statistik und *Bottom-up*-Modellsimulation

5.7 Validierung der Modellsimulation

Verifizierung und Validierung eines Simulationsmodells sind notwendige Schritte, um die Funktionalität des Modells zu testen. Mit der Verifizierung wird die korrekte softwaretechnische Umsetzung sichergestellt, indem auf Ebene der einzelnen Programmmethoden durch Überprüfungsroutinen und passender Input-Output-Testdaten die Funktion des Modells garantiert wird. Die Validierung wiederum überprüft, wie gut das Modell das zu repräsentierende System abbildet (Manson 2001). Dies erfolgt durch Vergleich der Simulationsergebnisse mit verfügbaren empirischen Daten. Die zentralen Ergebnisse des Modells stellen Investitionsentscheidungen unter verschiedenen energiepolitischen Randbedingungen dar. Für die Validierung werden daher die resultierenden Marktanteile mit historischen Daten für die Jahre 2009 bis 2011 verglichen. Um die Güte der simulierten Sanierungsaktivitäten zu beurteilen, wird ein Vergleich mit der

[77] Mit Wärmepumpen nutzbar gemachte Erd- und Umweltwärme

realen Entwicklung des Wärmeendenergiebedarfs im Gebäudebestand durchgeführt und die aus den Modellergebnissen resultierende äquivalente Vollsanierungsrate auf Plausibilität überprüft. Bei der Simulation werden die entsprechenden energiepolitischen Rahmenbedingungen für die Jahre 2009 bis 2011 im Modell hinterlegt und die realen Energiepreise angesetzt (vgl. 6.3.1).

5.7.1 Validierung der Marktentwicklung dezentraler Wärmeerzeuger

Als Vergleichsdaten für die Technologiewahl stehen die jährlich vom *BDH* veröffentlichte Marktentwicklung dezentraler Wärmeerzeuger (BDH 2012) sowie die Daten des Bundesverbands Solarwirtschaft (BSW-Solar 2013) zum Zubau von Solarthermieanlagen zur Verfügung. Die von den Verbänden veröffentlichten Daten stellen jedoch keine statistische Erhebung aller installierten Technologien dar, sondern basieren auf den Verkaufszahlen der Mitgliedsunternehmen der Verbände. Daten zu Fern- und Nahwärmeanschlüssen sowie Einzelraumheizungen und Öfen sind darin nicht enthalten. Insbesondere eine jahresscharfe Zuordnung der verkauften Anlagen ist mit einer gewissen Unschärfe behaftet, da die Zahlen auf der Ebene des Großhandels erhoben werden.

Tabelle 17 vergleicht die Simulationsergebnisse mit zur Verfügung stehenden Marktdaten für die Jahre 2009 bis 2011. Insgesamt werden im Modell durchschnittlich 6,2 Prozent mehr dezentrale Wärmeerzeuger pro Jahr getauscht bzw. neu installiert als vom Verband ausgewiesen. Da die Mitgliedsunternehmen des *BDH* nach eigenen Angaben rund 90 Prozent des Marktes in Deutschland abdecken (BDH 2010), ist die Größenordnung der gesamten Neuinstallationen dezentraler Wärmeerzeuger aus der Modellsimulation plausibel. Eine noch deutlichere Übereinstimmung weist die durchschnittliche Anzahl der installierten Solarthermieanlagen im Vergleich zu den vom *BSW-Solar* veröffentlichen Marktdaten auf (Tabelle 17). Die resultierende Austauschrate der Wärmeerzeuger beträgt 3 Prozent bzw. 2,5 Prozent ohne Neubau und entspricht damit den Angaben zur realen Austauschrate[78]. Beim Vergleich der durchschnittlichen Marktanteile der Jahre 2009 bis 2011 zeigt sich ebenfalls eine sehr gute Übereinstimmung. Die Rangfolge der Technologien wird getroffen und die Differenz der mittleren Marktanteile liegt für alle Technologiekategorien unter 2 Prozentpunkten. Die relative Abweichung der Marktanteile beträgt maximal 11 Prozent. Zusammengenommen beträgt der Unterschied bei den fossilen Wärmeerzeugern nur ein Prozentpunkt, wobei in der Modellsimulation der Anteil der Heizölkessel etwas überschätzt wird und stattdessen weniger

[78] BDH (2013) beziffert die Austauschrate von Wärmeerzeugern mit ca. 3 Prozent.

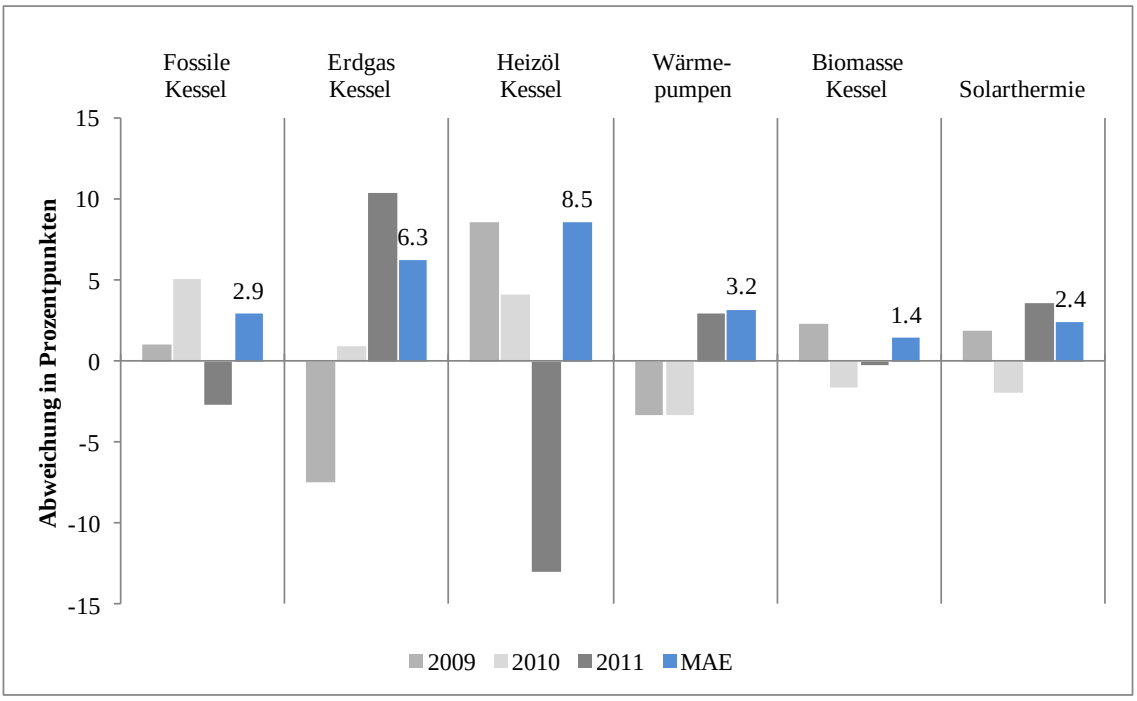
Erdgaskessel installiert werden. Die größte relative Abweichung verzeichnen Wärmepumpen, die im Modell mehr Marktanteile zugewiesen bekommen sowie Solarthermieanlagen, für die in der Modellsimulation etwas geringere Marktanteile resultieren.

Tabelle 17: Vergleich der Simulationsergebnisse mit durchschnittlichen historischen Marktdaten der Jahre 2009 bis 2011

Mittelwert über die Jahre 2009 - 2011	Marktdaten	Modellergebnis	Abweichung relativ
Absatz/Installation dezentrale Wärmeerzeuger	632 698	668 700	+ 6,18 %
Solarthermieanlagen	138 000**	138 125	+ 0,09 %
Nah- und Fernwärme	n/a	83 939	-
Einzelraumheizung	n/a	28 173	-
Mittlere Marktanteile dezentraler Wärmeerzeuger *			Abweichung Prozentpunkte
Fossile Kessel	87,9 %	86,9 %	- 1,0
Erdgas Kessel	72,1 %	70,6 %	- 1,51
Heizöl Kessel	15,8 %	16,3 %	+ 0,51
Wärmepumpen	8,6 %	9,7 %	+ 1,09
Biomasse Kessel	3,5 %	3,4 %	- 0.09
Solarthermie***	21,9 %	20,7 %	- 1.26

*ohne Fernwärme und Einzelraumheizung, Quelle: (BDH 2012); **Quelle: (BSW-Solar 2013)
***bezogen auf Gesamtanzahl verkaufter dezentraler Wärmeerzeuger

Im jahresscharfen Vergleich zeigen sich allerdings höhere Abweichungen zwischen Modellsimulation und Marktdaten (Abbildung 41). Insbesondere bei Erdgas und Heizöl ist eine komplementäre Verschiebung in den Jahren 2009 und 2011 zu beobachten. Dementsprechend liegt der mittlere absolute Fehler (MAE) über alle drei Jahre bei diesen beiden Technologiekategorien deutlich über den Abweichungen zwischen den jeweiligen Mittelwerten. Unter Berücksichtigung der erwähnten Unschärfe der Marktdaten in der jahresscharfen Zuordnung und den sehr geringen Abweichungen bei den durchschnittlichen Werten über die Jahre 2009 bis 2011 wird die Validierung der Marktanteile dezentraler Wärmeerzeuger jedoch insgesamt als sehr gut interpretiert.

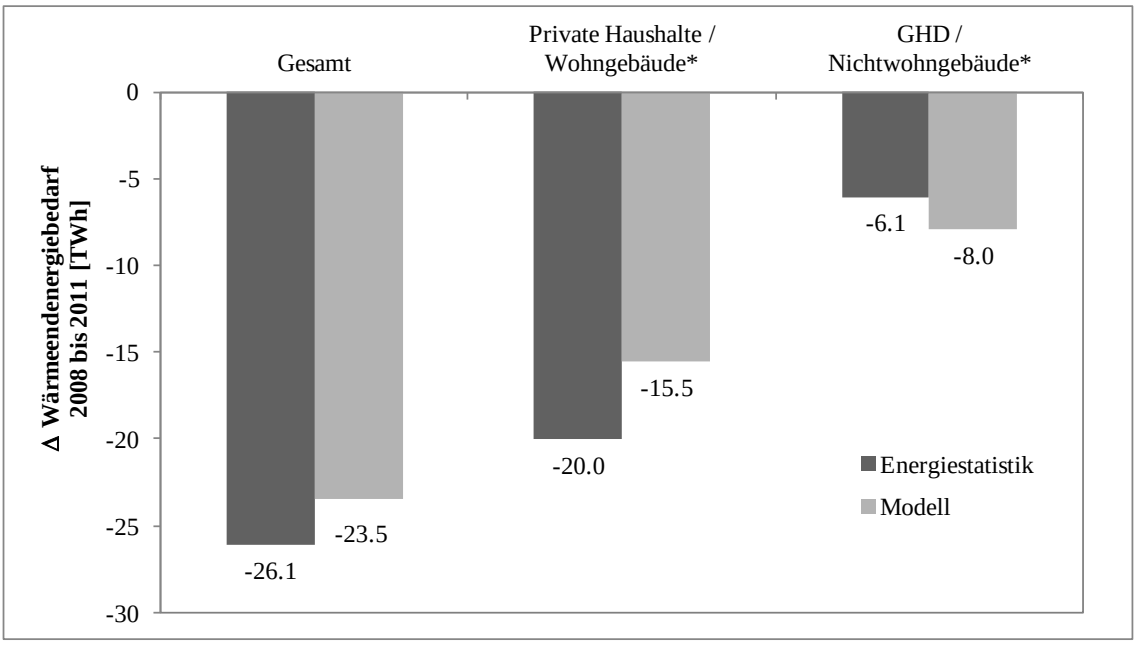


Quelle: Eigene Darstellung, historische Marktanteile auf Basis von (BAFA 2012; BDH 2012; BSW-Solar 2013); MAE = Mittlerer absoluter Fehler

Abbildung 41: Abweichung zwischen historischen Marktanteilen und Modellsimulation

5.7.2 Validierung der Endenergiebedarfsentwicklung

Als reale Vergleichsdaten für die simulierte Entwicklung des Endenergiebedarfs wird die temperaturbereinigte Differenz zwischen den Jahren 2008 und 2011 in den Anwendungen Raumwärme und Warmwasser herangezogen. Abbildung 42 zeigt den Vergleich zwischen Modellergebnis und der realen Entwicklung. Letztere basiert auf den Werten des Statistischen Bundesamtes für den Sektor Private Haushalte sowie auf Schlomann et al. (2013) für den GHD-Sektor (vgl. 5.6.7). Die Werte für den Sektor Private Haushalte werden bereits temperaturbereinigt ausgewiesen; für den GHD-Sektor wird eine entsprechende Temperaturbereinigung für die Anwendung Raumwärme vorgenommen (vgl. 5.6.6). Der Vergleich zeigt eine gute Übereinstimmung zwischen Modellsimulation und der Statistik hinsichtlich des gesamten Rückgangs des Endenergiebedarfs. Die Abweichung zwischen modellierter und realer Differenz für den Zeitraum 2008 bis 2011 beträgt 9,9 Prozent. Die Modellergebnisse weisen einen Rückgang des Wärmeendenergiebedarfs von 23,5 TWh aus, während die Statistik diesen mit 26,1 TWh beziffert. Der Vergleich auf Ebene der Sektoren mit den Modellergebnissen für Wohn- und Nichtwohngebäude zeigt erwartungsgemäß eine größere Abweichung, die auch auf die unterschiedliche Zurechnung zurückzuführen ist (vgl. 5.6.7).



Quelle: (Schlomann et al. 2013; StaBuA 2013c)

Abbildung 42: Vergleich zwischen realer Entwicklung des Wärmeendenergiebedarfs nach Energiestatistik und Modellergebnis

5.7.3 Validierung der Sanierungsaktivität

Die Entwicklung des Wärmeendenergiebedarfs wird neben klimatischen Bedingungen und Änderungen des Verbrauchsverhaltens maßgeblich durch die Sanierungsaktivität bestimmt. Ein weiterer Indikator zur Validierung der Modellsimulation stellt damit die energetische Sanierungsrate da. Allerdings gibt es dazu keine laufenden jahresscharfen Erhebungen. Von Diefenbach et al. (2010) liegen valide Werte mit Bezug auf die Jahre 2005 bis 2008 vor. Demnach betrug die durchschnittliche äquivalente Vollsanierungsrate im Wohngebäudebestand in diesen Jahren 0,83 Prozent. Der entsprechende Wert aus der Modellsimulation resultiert für die Jahre 2009 bis 20011 in 1,04 Prozent. Hinsichtlich der Sanierungsrate erscheinen die Modellergebnisse unter Berücksichtigung einer gestiegenen Sanierungsaktivität gegenüber 2005 bis 2008 plausibel, worauf der Anstieg der *KfW* geförderten energetischen Sanierungsmaßnahmen in den letzen Jahren schließen lässt (vgl. 3.3.5: Abbildung 18).

6 Analyse der Wirkung von Politikinstrumenten auf die Entwicklung des Energiebedarfs und die Entwicklung erneuerbarer Wärme

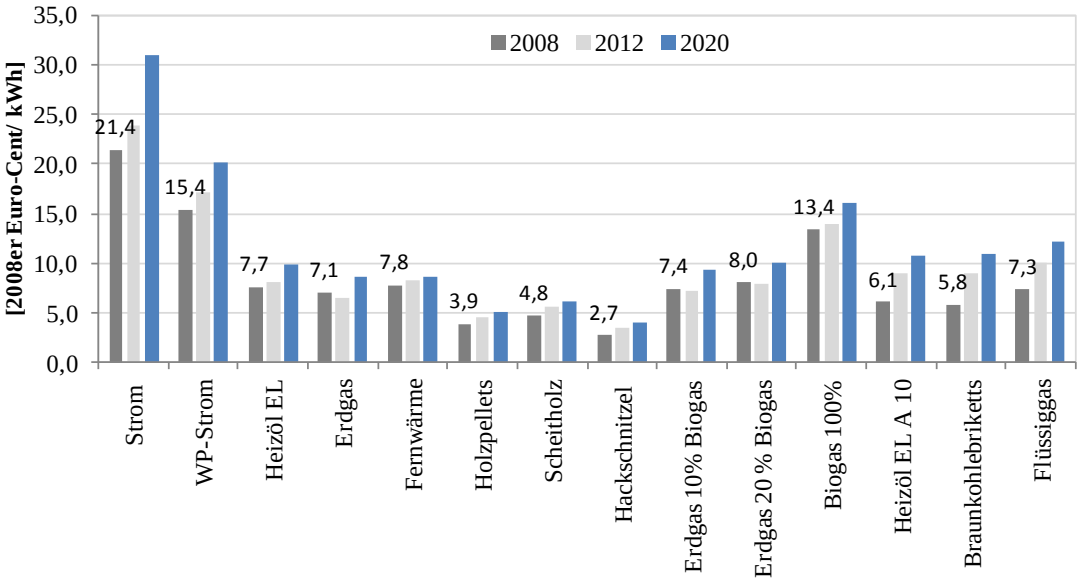
6.1 Einführung

Das im vorhergehenden Kapitel entwickelte Modell wird angewendet, um die Wirkung unterschiedlicher Politikinstrumente zur Förderung erneuerbarer Wärme und Energieeffizienzmaßnahmen im Gebäudebereich zu untersuchen. Dazu werden Maßnahmenbündel definiert, in denen einzelne Politikinstrumente zusammengefasst werden, welche im Anschluss mit dem Modell *Invert-Agents* in Szenarien bis zum Jahr 2020 untersucht werden. Für die jeweiligen Kerninstrumente der Maßnahmenbündel werden dabei unterschiedliche Politikvarianten hinsichtlich der wichtigsten Ausgestaltungsparameter gerechnet. Insgesamt werden 12 Politikszenarien und ein Referenzszenario mit der Simulation untersucht. Auf Grundlage der Modellergebnisse erfolgt eine Bewertung der Maßnahmenbündel hinsichtlich der Effektivität und Effizienz. Das Kapitel schließt mit den Ergebnissen der Sensitivitätsrechnung hinsichtlich der Energiepreisentwicklung.

6.2 Externe Rahmenbedingungen der Szenarien

6.2.1 Energiepreisentwicklung

Die Energiepreisentwicklung orientiert sich am *Preispfad A* der *BMU Leitstudie 2011* (Nitsch et al. 2012). Da die für das Modell benötigten Energiepreise auf Endverbraucherebene jedoch nur teilweise vorliegen, werden die historischen Preise auf Endverbraucherebene mit den Steigerungsraten der Großhandels- bzw. Einfuhrpreise fortgeschrieben. Abbildung 43 zeigt die historischen Energiepreise für das Jahr 2008 und die Energiepreisentwicklungen im Vergleich für die Jahre 2015 und 2020. Bis einschließlich zum Jahr 2012 werden historische Endverbraucherpreise angesetzt, die auf reale Preise mit Basisjahr 2008 umgerechnet werden. In der angesetzten Energiepreisentwicklung steigt der Haushaltstrompreis von 2013 bis 2020 um 30 Prozent, Erdgas um 22 Prozent und Heizöl um 32 Prozent. Die Energiepreissteigerung der biogenen Brennstoffe beträgt 13 Prozent für Holzpellets, für Scheitholz 8,5 Prozent und 13 Prozent für Hackschnitzel.



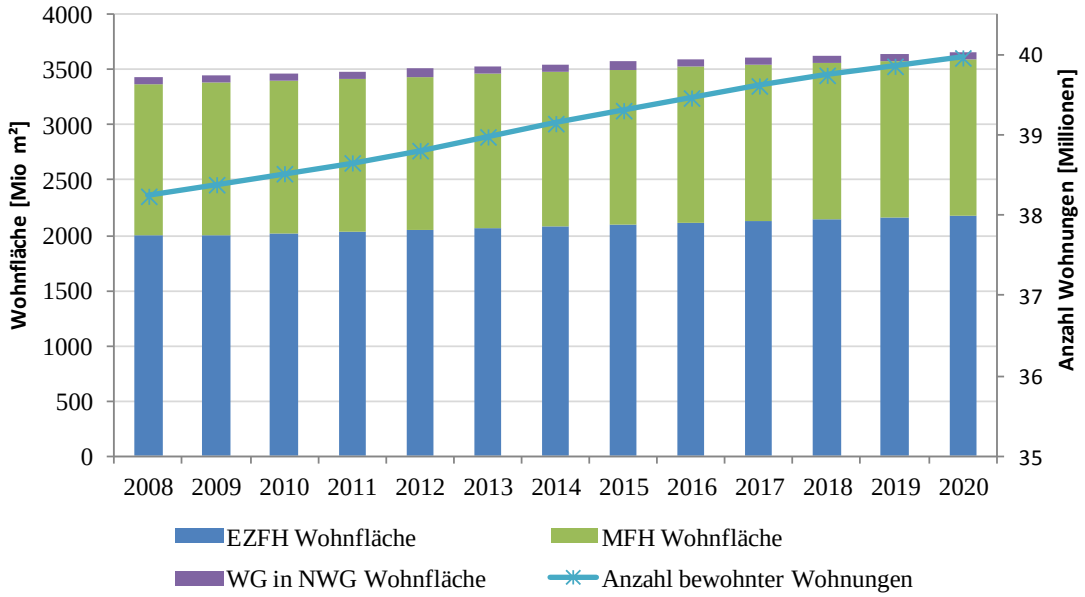
Quelle: Preisentwicklung: (Nitsch et al. 2012; Schlesinger et al. 2010) historische Preise: (BMWi 2012; C.A.R.M.E.N 2013a, 2013b; TFZ 2009, 2011, 2013)

Abbildung 43: Energiepreisentwicklung für die Modellsimulation

Um den Einfluss der Energiepreise auf die Ergebnisse zu untersuchen, erfolgen in Abschnitt 6.6 Sensitivitätsrechnungen hinsichtlich der Preissteigerung unterschiedlicher Energieträger.

6.2.2 Entwicklung des Gebäudebestandes

Neben den Energiepreisen stellen die Entwicklung des Gebäudebestandes und der Wohnflächen relevante externe Rahmenbedingungen für die Modellsimulation dar (Abbildung 44). Für die Jahre 2009 bis 2012 wird die reale Entwicklung des Gebäudebestandes entsprechend der Baufertigstellungs- und Abrissstatistik fortgeschrieben. Die weitere Entwicklung orientiert sich an den Annahmen der „*Energieszenarien für ein Energiekonzept der Bundesregierung*“ (Schlesinger et al. 2010).



Quelle: Eigene Darstellung, (Schlesinger et al. 2010)

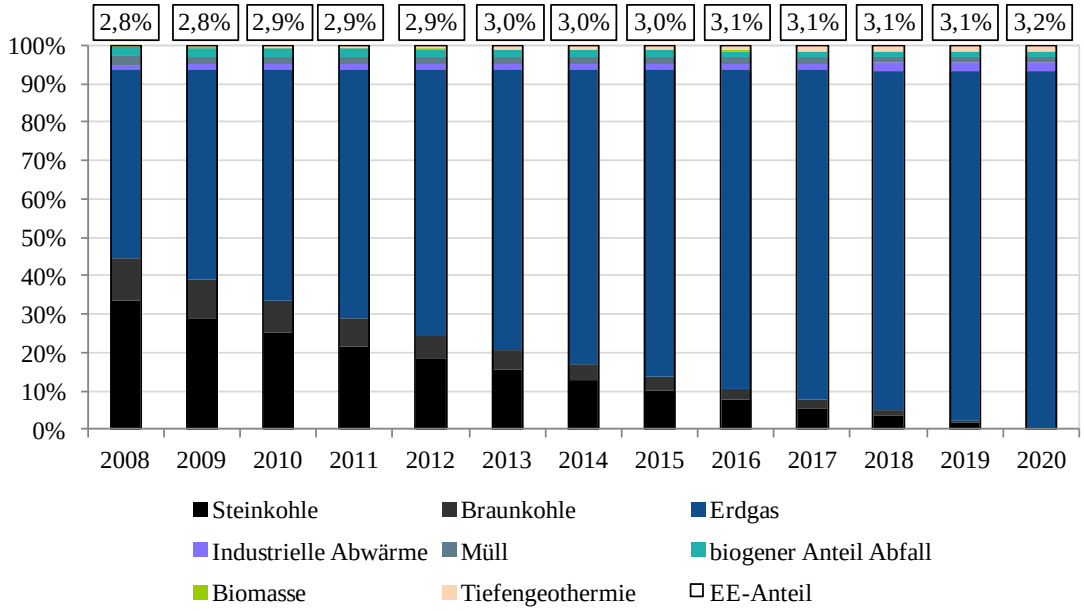
Abbildung 44: Entwicklung der Wohnfläche und der Wohnungsanzahl

6.2.3 Entwicklung des Fernwärmepotentials in Abhängigkeit der Politikszenarien

Fern- und Nahwärmeoptionen sind im Modell aus Sicht eines Investors bzw. Gebäudeeigentümers implementiert. Die Optionen stehen in jeweiligen Energieträgerregionen als Wärmeerzeuger zu Wahl, wobei die für den Investor sichtbaren ökonomischen und nicht ökonomischen Parameter die Dynamik der wärmenetzgebundenen Wärmeversorgung nur unzureichend abbilden kann. Das wirtschaftliche Fernwärmepotential bis zum Jahr 2020 wird daher als maximale Grenze vorgegeben, bei der die Option den Investorenagenten nicht mehr zur Verfügung steht. Die Verdichtung vorhandener und der Zubau neuer Wärmenetze hängen neben der Energiepreisentwicklung maßgeblich von der Entwicklung der Wärmedichte in geeigneten siedlungstypologischen Gebieten ab. Zur Ermittlung des wirtschaftlichen Fernwärmepotentials wird das Modell mit dem *BEI Fernwärmemodell* des Bremer Energie Instituts[79] gekoppelt, welches die Wärmebedarfsentwicklung siedlungstypologisch auflöst (Kranzl et al. 2012; Steinbach, Herbst, et al. 2013). Als weiteres Ergebnis liefert das *Fernwärmemodell* die Entwicklung der Energieträgeraufteilung in Fernwärmenetzen, welche zur Bewertung der Politikszenarien hinsichtlich der Zielerreichung relevant ist (Abbildung 45). Der Bereich biogene

[79] Seit Mitte 2013 Fraunhofer IFAM. Die integrierte Modellierung ist im Rahmen des Projektes „Erarbeitung einer Integrierten Wärme- und Kältestrategie“ durchgeführt worden.

Nahwärmeversorgung wird durch das *BEI Fernwärmemodell* jedoch noch adressiert. Hier wird sich an den Potentialgrenzen der *BMU Leitstudie* orientiert (Nitsch et al. 2012).

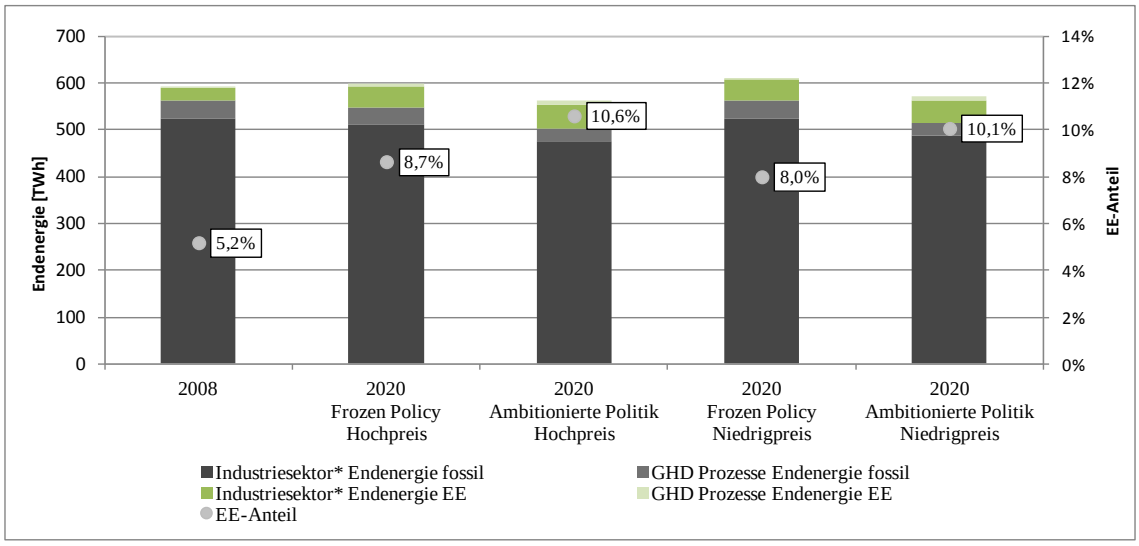


Quelle: Eigene Darstellung auf Basis der Analysen des *Fraunhofer IFAM* (vormals *Bremer Energie Institut*); (Kranzl et al. 2012)

Abbildung 45: Energieträgerentwicklung in der Fernwärmeversorgung

6.2.4 Entwicklung im Bereich der Prozesswärme

Eine detaillierte Untersuchung des Wärmebedarfs und des Energieträgermix im Industriesektor und im Bereich Prozesswärme insgesamt ist nicht Bestandteil dieser Arbeit. Da sich jedoch die Ziele des *EEWärmeG* zum Ausbau erneuerbarer Energien auf den gesamten Wärmebereich beziehen (vgl. 3.3.2), ist die Entwicklung in diesem Bereich bis zum Jahr 2020 ebenfalls relevant. Daher wird auf aktuelle Szenarien zurückgegriffen, die im Rahmen des Projektes „Erarbeitung einer Integrierten Wärme- und Kältestrategie“ mit dem Modell *Forecast/ProcServ* ermittelt worden sind (vgl. Steinbach et al. 2012). Den Szenarien für den Industriebereich liegen die gleichen externen Rahmenbedingungen zugrunde. Abbildung 46 zeigt die resultierende Entwicklung des Endenergiebedarfs für das Jahr 2020 für zwei Energiepreispfade und unter unterschiedlichen Annahmen zu energiepolitischen Rahmenbedingungen für den Industriesektor. Die Hochpreisvarianten orientieren sich an der *Leitstudie* und sind somit konsistent mit der Energiepreisentwicklung, wie sie in der Untersuchung dieser Arbeit Verwendung finden.



* Raumwärme, Prozesswärme und -kälte

Quelle: Eigene Darstellung basierend auf den Analysen des *Instituts für Ressourceneffizienz und Energiestrategien (IREES)*; (Steinbach et al. 2012)

Abbildung 46: Entwicklung des Wärmebedarfs im Industriesektor und der GHD-Prozesse

6.3 Beschreibung der untersuchten Politikszenarien für den Gebäudebereich

Die Definition der zu untersuchenden Politikinstrumente orientiert sich an den Arbeiten des Projektes „Erstellung einer Integrierten Wärme- und Kältestrategie für Deutschland“, welches als Forschungsauftrag für das *BMU* in den Jahren 2009 bis 2013 durchgeführt wurde. Die definierten Maßnahmenbündel sind in Absprache mit dem Auftraggeber entwickelt worden und haben demnach eine hohe Relevanz für die zukünftige energiepolitische Ausgestaltung im Bereich der erneuerbaren Wärme und der Energieeffizienz im Gebäudebereich. Das Vorgehen bei der Definition der Maßnahmenbündel wird in Bürger et al. (2012) dargestellt. Zunächst werden Maßnahmenbündel anhand energiepolitischer Grundprinzipien definiert, mit denen passende Politikinstrumente zusammengefasst werden. Im zweiten Schritt werden Kerninstrumente identifiziert, die anhand der wichtigsten Ausgestaltungsparameter variiert werden. Neben der Variation der Kerninstrumente wird in jedem Maßnahmenbündel jeweils eine Variante gerechnet, in der die Wirkung flankierender Maßnahmen zur Adressierung investorenspezifischer Hemmnisse untersucht wird. Als Referenz zur Bewertung der Maßnahmenbündel wird zunächst ein sogenanntes *Frozen-Policy*-Szenario als Referenzentwicklung des derzeitigen Rechts- und Förderrahmens modelliert. Die Änderung der Politikinstrumente gegenüber dem *Frozen-Policy*-Szenario werden im Modell für die einzelnen Politikszenarien frühestens ab dem Jahr 2014 implementiert.

6.3.1 Frozen Policy: Fortschreibung der derzeitigen Politik

Im *Frozen-Policy*-Szenario wird der derzeitige Rechts- und Förderrahmen für Energieeffizienz und EE-Wärme bis zum Jahr 2020 fortgeschrieben. Die in Kapitel 3.3 dargestellten Politikinstrumente werden in ihrer Ausgestaltung bis zum Jahr 2020 nicht geändert. Veränderungen der energiepolitischen Rahmenbedingungen, die sich in den Jahren 2008 bis 2012 ergeben haben, werden im Modell berücksichtigt. Tabelle 18 liefert einen Überblick zu den zentralen Politikinstrumenten und deren Ausgestaltung in der Modellsimulation.

Tabelle 18: Ausgestaltung der modellierten Kerninstrumente im *Frozen-Policy*-Szenario

Kerninstrumente	Parameter	Ausgestaltung bis 2020
EnEV	Umfang/ Auslösetatbestand: Anforderungsniveau:	Neubau Sanierung von Gebäuden EnEV 2009 (vgl. 3.3.4)
EEWärmeG	Umfang/ Auslösetatbestand: Mindestanteile und Ersatzmaßnahmen:	Seit 2009 Neubau Seit 2012 Öffentliche Gebäude im Falle grundl. Sanierung siehe Tabelle 3
MAP	Förderbudget: Fördertatbestände: Investitionszuschuss:	∅ 260 Mio. €/a (schwankend) EE-Wärmeerzeuger in Bestandsgebäuden Neubau nur in 2009 zu 75 % Technologiespez: 4 % - 20 % EE in Bestandsgebäude
KfW Energieeffizient Sanieren/Energieeffizient Bauen	Umfang Förderbudget: Tilgungszuschuss/ Zinsvergünstigung:	Gebäude Baujahr vor 1995 Neubau ∅ 900 Mio. €/a (schwankend) ∅ 450 Mio. €/a (schwankend) 12,5 % KfW 100/85(Neubau) 20 % KfW 55 7,5 % Brennwertkessel/BHKW

Die ordnungsrechtlichen Instrumente werden zum Stand des Jahres 2012 fortgeschrieben. Die ab 2016 in Kraft tretenden Änderungen der *EnEV* (vgl. 3.3.4) werden im *Frozen-Policy*-Szenario nicht berücksichtigt. Stattdessen wird die Novellierung in einer

weiteren Szenario-Variante implementiert (vgl.6.3.1), was eine separate Bewertung dieser beschlossenen Maßnahme erlaubt. Bei den finanziellen Förderinstrumenten wird ein maximales jährliches Budget für den Simulationszeitraum vorgegeben, welches dem Mittelwert der ausgezahlten Zuschüsse der Jahre 2006 bis 2012 entspricht. Um die Schwankungen der haushaltsabhängigen Förderungen, wie sie in der Vergangenheit aufgetreten sind, abzubilden, werden auch in der Fortschreibung Schwankungen des jährlichen Budgets angesetzt.[80].

6.3.1 Maßnahmenbündel Ordnungsrecht

In diesem Maßnahmenbündel liegt der Fokus auf einer Verschärfung der ordnungsrechtlichen Anforderungen. Die Änderungen gegenüber dem *Frozen-Policy*-Szenario werden in Tabelle 19 dargestellt. Für die Kerninstrumente *EnEV* und *EEWärmeG* werden unterschiedliche Varianten modelliert. Als zentraler Ausgestaltungsparameter wird bei letzterem der Auslösetatbestand variiert, während bei der *EnEV* unterschiedliche Anforderungsniveaus für Neubau und Bestandsgebäude sowie des zeitlichen Verlaufs der Novellierung analysiert werden. In der ersten Variante (*Neubau EnEV 2014)* wird im Vergleich zum *Frozen-Policy*-Szenario nur das Anforderungsniveau der *EnEV* an den Neubau geändert, so wie es durch die letzte Novellierung im Jahr 2013 beschlossen wurde. In den anderen Varianten wird verstärkt der Gebäudebestand adressiert, indem die *EnEV*-Anforderungen verschärft werden und das *EEWärmeG* auf Bestandsgebäude ausgeweitet wird. Zudem wird die im *Energiekonzept* vorgesehene Erhöhung der Sanierungsrate auf 3 Prozent für öffentliche Bestandsgebäude im Modell berücksichtigt. Finanzielle Fördermaßnahmen erfahren im Vergleich zur derzeitigen Förderpolitik keine Verbesserung und werden teilweise zurückgefahren. Der Bezug der *KfW Effizienzhausförderung* auf die jeweils geltende *EnEV* (vgl. 3.3.5) wird im Modell berücksichtigt, so dass sich bei Verschärfung der *EnEV* unter gleichen spezifischen Zuschüssen ein höheres Anforderungsniveau ergibt.

In der zweiten Variante wird die Nutzungspflicht für erneuerbare Energien auf den Gebäudebestand ausgeweitet mit dem Auslösetatbestand einer grundlegenden Sanierung des Gebäudes – wie es auch in der *Erneuerbaren-Energien-Richtlinie* gefordert wird (vgl. 3.3.1).

---

[80] Es wird eine Schwankung zwischen 50 und 100 Millionen Euro zwischen den Simulationsjahren angesetzt, die sich an der Standardabweichung und dem Median der jährlichen ausgezahlten Zuschüsse in den Jahren 2005 bis 2012 orientiert. Die Standardabweichung des jährlichen ausgezahlten Budgets (2005 bis 2012) beträgt 104 Millionen Euro. Der Median der Abweichungen beträgt 47 Millionen Euro (vgl. Abbildung 16).

Tabelle 19: Modellierte Politikvarianten im Maßnahmenbündel Ordnungsrecht

	Ordnungsrecht 01: Neubau EnEV2014	**Ordnungsrecht 02**: Bestand	**Ordnungsrecht 03**/ **Ordnungsrecht 04**: Bestand ambitioniert
EnEV	Verschärfung Neubau um 20 % bezogen auf Ht' ab 2016	Neubau/ Gebäudebestand um 20 % bezogen auf Ht' ab 2016	Neubau/ Gebäudebestand um 20 % bezogen auf Ht' ab 2014
EEWärmeG	Keine Änderungen	Nutzungsplicht EE im Bestand ab 2016 Auslösetatbestand: Sanierung	Nutzungsplicht EE im Bestand ab 2014 Auslösetatbestand: Heizsystemwechsel Härtefallregel/ Ersatzabgabe[81]: 150 €/m²
MAP	Keine Änderungen	Keine Änderung	Reduktion um 50 %
KfW	Anforderungsniveau KfW-Effizienzhäuser entsprechend EnEV Verschärfung	Anforderungsniveau KfW-Effizienzhäuser entsprechend EnEV Verschärfung	Anforderungsniveau KfW-Effizienzhäuser entsprechend EnEV Verschärfung
Zusatz	-	Erhöhung Sanierungsrate öffentliche Gebäude auf 3 % ab 2016	Erhöhung Sanierungsrate Öffentliche Gebäude auf 3 % ab 2014 **Ordnungsrecht 04:** Verbesserung Vollzug/Information

In der dritten Variante wird als Auslösetatbestand der Nutzungspflicht der Wechsel des Wärmeversorgungssystems gewählt. Gleichzeitig wird die spezifische Förderung der EE-Wärmeerzeuger um 50 Prozent reduziert[82]. Anstelle der ersatzweisen Erfüllung

[81] Die Ersatzabgabe setzt die Grenze für die Verhältnismäßigkeit der zusätzlichen Belastungen, ab der die Primärpflicht des *EEWärmeG* entfällt. Die Abgabe von 150 €/m² entspricht Mehrinvestitionen von 22 000 € für ein Einfamilienhaus mit einer Wohnfläche von 140 m².

[82] Die finanzielle Förderung einer ordnungsrechtlich vorgeschriebenen Maßnahme ist unter Berücksichtigung technischer und wirtschaftlicher Hemmnisse durchaus sinnvoll. Allerdings ist diese doppelte Adressierung politisch und rechtlich umstritten (Klinski et al. 2013).

durch zusätzliche Energieeffizienzmaßnahmen wird eine Härtefallregelung vorgesehen, die als Ersatzabgabe im Modell implementiert wird[81]. Variante 4 entspricht in der Ausgestaltung der Kerninstrumente der dritten Variante, allerdings wird zusätzlich noch der Effekt der verbesserten Compliance und Information der Investoren bzw. eines verstärkten Vollzugs ordnungsrechtlicher Anforderungen der *EnEV* ermittelt[83].

6.3.2 Maßnahmenbündel haushaltsabhängige Förderung

Finanzielle Förderinstrumente werden in diesem Maßnahmenbündel mit mehr Finanzmittel ausgestattet und die spezifischen Fördersätze werden erhöht (Tabelle 20).

Tabelle 20: Modellierte Politikvarianten im Maßnahmenbündel haushaltsabhängige Förderung

	FinanzielleHaAb 01: Ausweitung	**FinanzielleHaAb 02/** **FinanzielleHaAb 03:** Konzentration
EnEV	Keine Änderung	Keine Änderung
EEWärmeG	Keine Änderungen	Keine Änderung
MAP	∅ 450 Mio. €/a Spez. Fördersätze x 1,5	∅ 450 Mio. €/a Spez. Fördersätze unverändert
KfW	Bestand: ∅ 2500 Mio.€/a Neubau: ∅ 650 Mio.€/a Fördersätze x 1,5	Bestand: ∅ 3150 Mio. €/a Fördersätze x 1,7 Keine Neubauförderung Keine Förderung fossiler Wärmeerzeuger
Zusatz	-	**FinanzielleHaAb 03:** Verbesserung Kreditzugangsmöglichkeiten, Information über Förderinstrumente

Das Förderbudget der *KfW* Programme wird in allen Varianten auf durchschnittlich 3,15 Milliarden Euro pro Jahr erhöht. Die finanzielle Ausstattung des *MAP* wird gegenüber dem *Frozen-Policy*-Szenario um 50 Prozent auf durchschnittlich 450 Million Euro pro Jahr erhöht. Aufgrund der Haushaltsabhängigkeit der Mittelzuteilung wird bei den fi-

[83] Im Modell wird dafür der Informationsgrad (*information_awareness*) der Investorenagenten ab dem Jahr 2014 um durchschnittlich 20 Prozent hochgesetzt (vgl. 5.5.1).

nanziellen Förderinstrumenten jedoch weiterhin ein schwankendes Förderbudget unterstellt.

Die erste Variante stellt eine reine Ausweitung der finanziellen Förderung dar, während in der zweite Variante zusätzlich zu der höheren budgetären Ausstattung eine Konzentration der Fördermittel vorgenommen wird, indem die Mittel der Neubauförderung auf den Gebäudebestand transferiert werden und die *KfW* Förderung fossiler Wärmeerzeuger wegfällt. Die spezifischen *MAP*-Fördersätze werden in der Variante *Konzentration* dafür nicht erhöht. In der dritten Variante wird zusätzlich noch die Wirkung einer verbesserten Information der Investoren über finanzielle Förderinstrumente und eine Verbesserung der Kreditzugangsmöglichkeiten, z. B. durch Kreditbürgschaften, untersucht.

6.3.3 Maßnahmenbündel haushaltsunabhängige Förderung

In diesem Maßnahmenbündel erfolgt eine Verstetigung der Fördermaßnahmen durch Umstellungen auf eine haushaltsunabhängige Finanzierung (Tabelle 21). Für die Förderung der energetischen Gebäudesanierung fällt damit die Budgetbegrenzung weg. Die *MAP*-Förderung wird durch ein umlagefinanziertes Förderinstrument ersetzt (vgl. 3.4.2), welches entweder auf Basis festgeschriebener Vergütungen operiert (*Prämienmodell*) oder eine quotale Verpflichtung einführt (*Portfoliomodell*).

Mit der ersten Variante wird die Wirkung des Prämienmodells untersucht. Die spezifischen Fördersätze für EE-Wärmeerzeuger und energetische Gebäudesanierung werden gegenüber dem *Frozen-Policy*-Szenario verdoppelt.

In der zweiten und dritten Variante wird das *Portfoliomodell* zum einem mit technologiespezifischer Gewichtung, zum andern als technologieneutrale Quote untersucht. Die zu erreichende Quote ergibt sich aus der mit neu installierten Wärmeerzeugern pro Jahr bereitgestellte EE-Nutzenergie im Zähler und dem jährlich gesamten Endenergiebedarf fossiler Brennstoffe von Bestands- und Neuanlagen im Nenner. In beiden Varianten wird eine Quote von 1,5 Prozent ab dem Jahr 2014 angesetzt, die bis zum Jahr 2020 kontinuierlich auf 2,1 Prozent steigt. Bei der technologiespezifischen Gewichtung erhält die Solarthermie in Anlehnung an die Mindestanteile des EEWärmeG eine höhere Gewichtung gegenüber den primären EE-Wärmeversorgungssystemen.

In der vierten und fünften Variante werden analog zu den flankierenden Maßnahmen im Maßnahmenbündel *haushaltsabhängige Förderung* (vgl. 6.4.3) die Wirkung einer verbesserten Information der Investoren, jeweils in Kombination mit dem *Prämien-* und dem *Portfoliomodell* untersucht.

Tabelle 21: Modellierte Politikvarianten im Maßnahmenbündel haushaltsunabhängige Förderung

	Finanzielle HaUn 01 **Finanzielle HaUn 05:** Prämienmodell	**Finanzielle HaUn 02:** Portfoliomodell technologiespezifisch	**Finanzielle HaUn 03** **Finanzielle HaUn 04**: Portfoliomodell technologieneutral
EnEV	Keine Änderung	Keine Änderung	Keine Änderung
EEWärmeG	Keine Änderung	Keine Änderung	Keine Änderung
MAP	Ab 2014 Ersatz durch Prämienmodell Fördersätze x 2	Ab 2014 Ersatz durch Portfoliomodell Steigende Quote: 1,5 % - 2,1 % Gewichtungsfaktoren: Solarthermie: 3,3 Primäre EE Syst.: 1	Ab 2014 Ersatz durch Portfoliomodell Steigende Quote: 1,5 % - 2,1 %
KfW	Keine Budgetgrenze Fördersätze x 2	Keine Budgetgrenze Fördersätze x 2	Keine Budgetgrenze Fördersätze x 2
Zusatz	**Finanzielle HaUn 05:** Verbesserte Information der Investoren über Förderinstrumente		**Finanzielle HaUn 04**: Verbesserte Information der Investoren über Förderinstrumente

6.4 Ergebnisse der Szenarien

Im Folgenden werden zunächst die Ergebnisse als *Frozen-Policy*-Szenarios als Referenzentwicklung dargestellt. In den darauffolgenden Abschnitten werden die resultierenden Änderungen und zusätzlich induzierten Wirkungen der unterschiedlichen Politikvarianten dargestellt.

6.4.1 Ergebnisse des Frozen-Policy-Szenarios

Abbildung 47 zeigt die Entwicklung des Wärmeendenergiebedarfs im *Frozen-Policy*-Szenario. Die Modellergebnisse weisen bis zum Jahr 2020 einen Rückgang um 11,6 Prozent gegenüber 2008 auf. Der Nutzung fossiler Brennstoffe in der Wärmeversorgung sinkt um 19 Prozent, wobei der Rückgang insbesondere auf den Austausch von Heizölkesseln zurückzuführen ist, während der Endenergiebedarf von Erdgas nur um rund 3 Prozent sinkt. Die Nutzung von Strom zur Wärmeversorgung sinkt insge-

samt um mehr als ein Drittel. Der Endenergiebedarf elektrischer Direkt- und Nachtspeicherheizungen sinkt dabei um rund 19 TWh, während der Strombedarf durch Wärmepumpen um rund 3 TWh steigt. Die Wärmebereitstellung durch Fernwärme und erneuerbare Energien steigt hingegen absolut um 9 bzw. 39 Prozent. Werden Erd- und Umweltwärme sowie Solarthermie nicht in der Endenergie bilanziert, ergibt sich aufgrund des gestiegenen Anteils dieser Energieträger ein Rückgang des Wärmeendenergiebedarfs von 13,6 Prozent, welcher auch die Vergleichsgröße für das Effizienzziel im Gebäudebereich darstellt (vgl. 3.3.2). Das *Energiekonzept/Energiewende*-Ziel eines 20-prozentigen Rückgangs des Wärmeendenergiebedarfs im Gebäudebereich wird somit im *Frozen Policy* deutlich verfehlt.

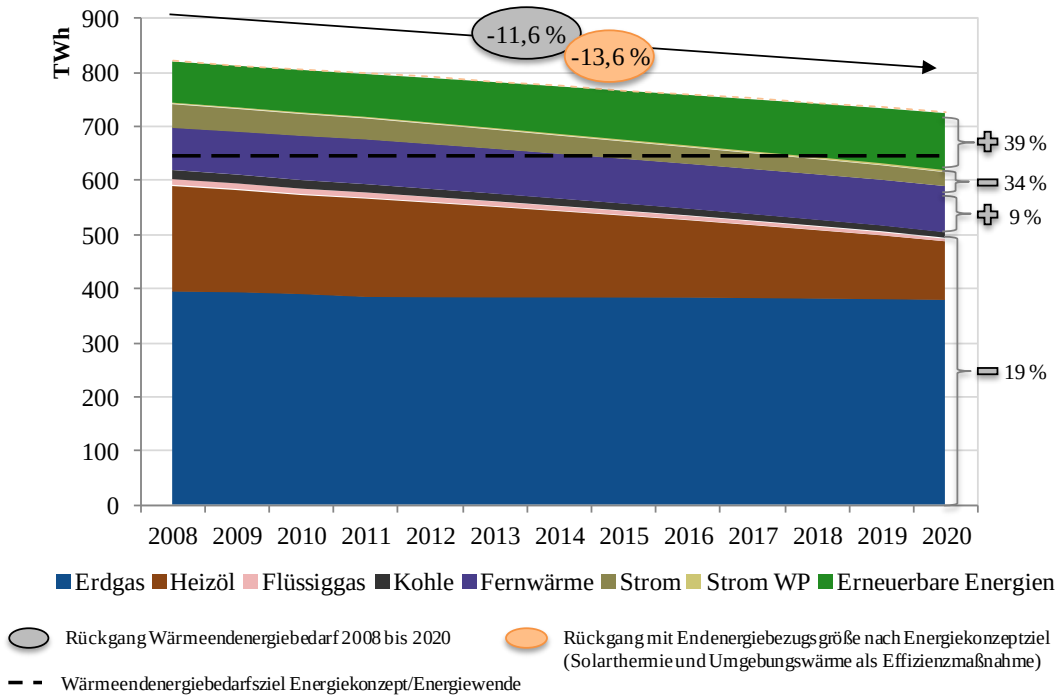


Abbildung 47: Entwicklung des Wärmeendenergiebedarfs im *Frozen-Policy*-Szenario

Der Anteil der erneuerbaren Energien am Wärmeendenergiebedarf steigt auf 14,9 Prozent bis zum Jahr 2020 (Abbildung 48). Die Ergebnisse zeigen eine annähernde Verdreifachung der Wärmebereitstellung durch Solarthermie sowie durch Erd- und Umweltwärme auf zusammen 15 TWh. Scheitholz, welches überwiegend in Einzelraumöfen zur Wärmebereitstellung verwendet wird, hat im Jahr 2020 immer noch den größten Anteil im Bereich der Biomasse, allerdings zeigen die Modellergebnisse einen deutlichen Wechsel zu Holzpellets und Hackschnitzeln, die in automatisch beschickten Kesseln Verwendung finden. Die Wärmebereitstellung durch biogene Nahwärme steigt ebenfalls deutlich auf rund 14 TWh. Das „14-Prozent“-Ziel wird zwar im Gebäudebe-

reich überschritten, allerdings nicht mit Bezug auf den gesamten Wärmebereich, wie es durch das *EEWärmeG* definiert wird (vgl. 3.3.2). Unter Einbeziehung der in Abschnitt 6.2.4 dargestellten Entwicklung im Prozesswärmebereich und im Industriesektor liegt das EE-Wärme-Ziel für den Gebäudebereich zwischen 16,6 bis 18,4 Prozent. Auch im Fall eines ambitionierteren Ausbaus der erneuerbaren Energien im Industriesektor, wird somit im *Frozen-Policy*-Szenario das „14-Prozent"-Ziel für den Wärmebereich verfehlt.

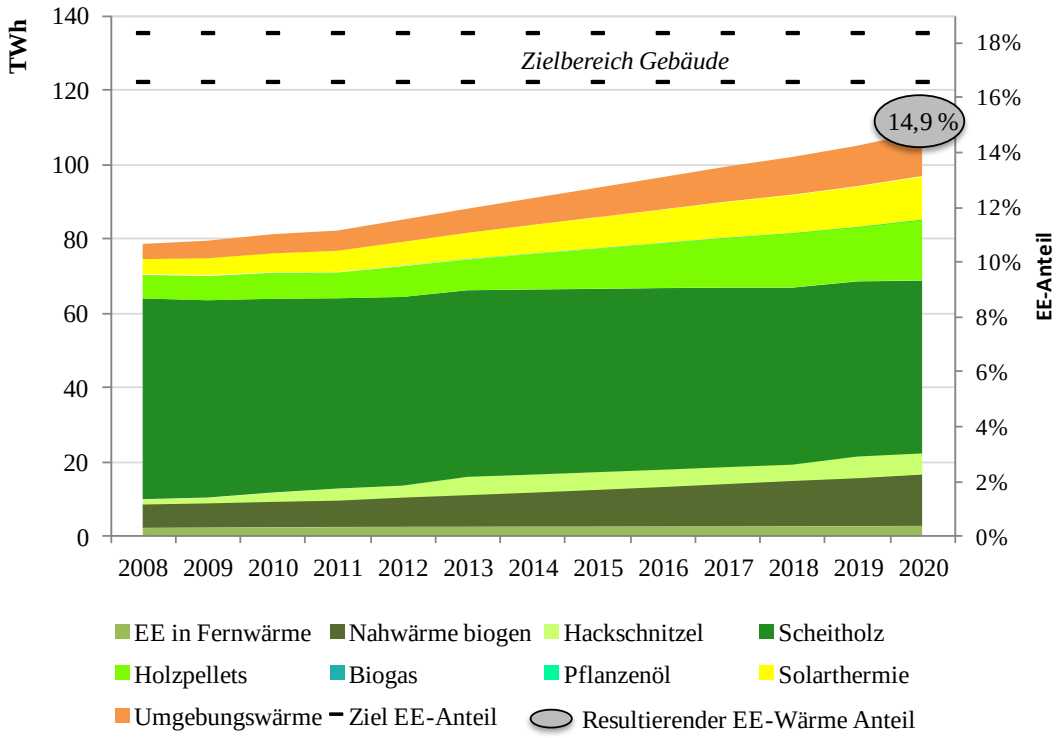
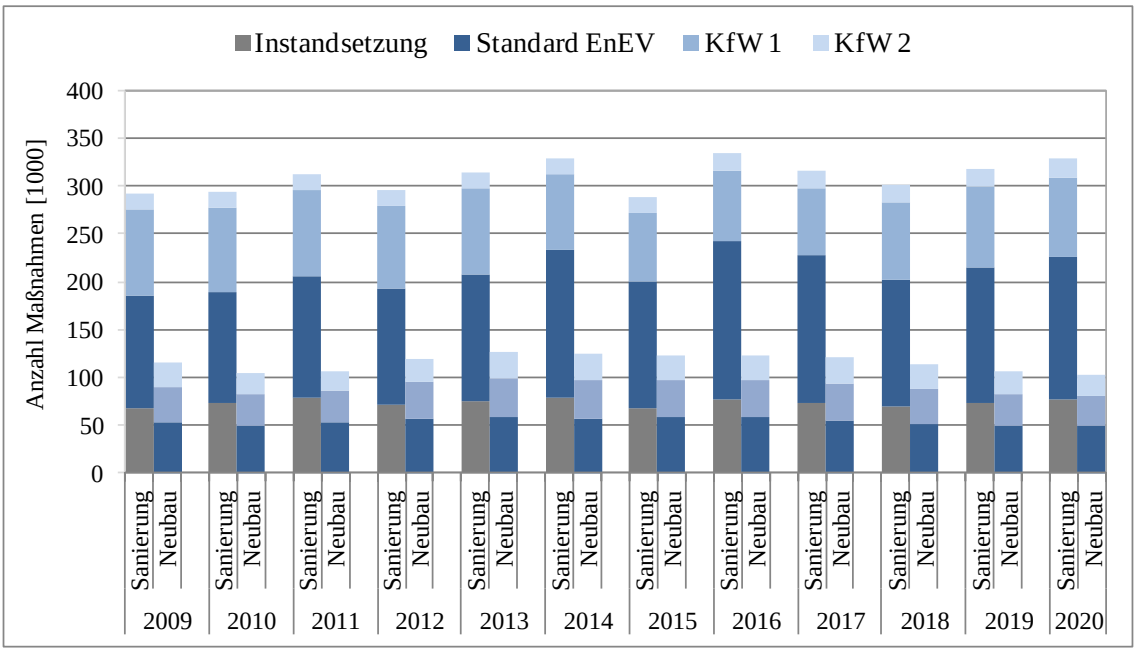


Abbildung 48: Entwicklung der EE-Wärme im *Frozen-Policy-Szenario*

Marktanteile und Investitionen in Sanierungsmaßnahmen

Als Haupttreiber für den Rückgang des Wärmeendenergiebedarfs wird in Abbildung 49 die Entwicklung der jährlichen Sanierungsmaßnahmen sowie der gewählten Neubaustandards der Investoren dargestellt. Im Gebäudebestand werden bis 2020 durchschnittlich 23,7 Prozent reine Instandsetzungsmaßnahmen gewählt, ohne Verbesserung der energetischen Qualität der Gebäudehülle. Den größten Anteil haben Standardsanierungen entsprechend der *EnEV*-Anforderungen mit 44 Prozent. Sanierung im *KfW Effizienzhausstandard 100* (vgl. 5.6.5) werden in 26,5 Prozent der Fälle gewählt, während ambitionierte Sanierungen im *KfW Effizienzhausstandard 55* durchschnittlich 5,7 Prozent der Sanierungsmaßnahmen entsprechen. Bei Neubauten ist der Anteil

ambitionierterer Standards mit durchschnittlich 21 Prozent für *KfW 55* und 32 Prozent für *KfW 85* deutlich höher.

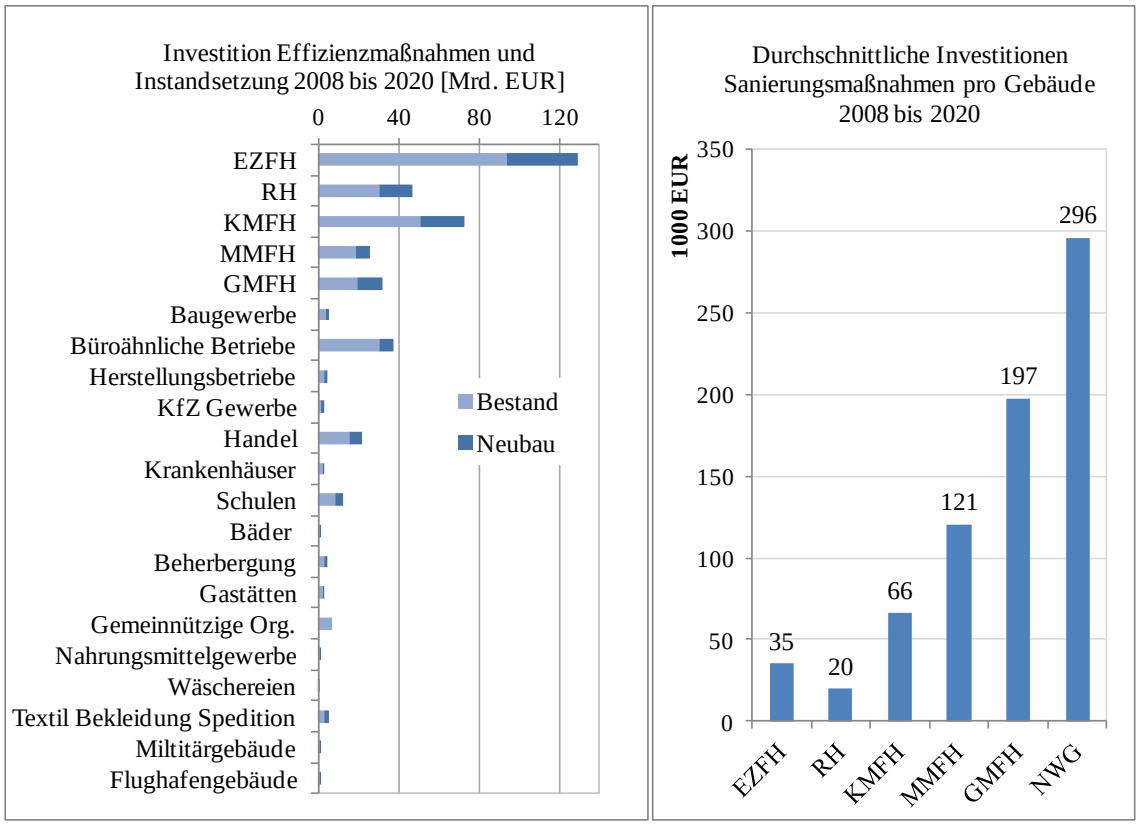


KfW1: Sanierung Effizienzhaus 100/85, KfW 2: Sanierung Effizienzhaus 55

Abbildung 49: Gewählte Sanierungsmaßnahmen und Neubaustandards im *Frozen-Policy-Szenario*

Die Investitionen für Effizienzmaßnahmen inklusive Instandsetzung belaufen sich in Bestandsgebäuden bis 2020 auf 213 Milliarden Euro im Wohngebäudebereich und 80 Milliarden im Nichtwohngebäudebereich. Die Investitionen in Wärmedämmungen von Neubauten kumulieren sich bis 2020 auf 80 Milliarden Euro für Wohngebäude und 41 Milliarden für Nichtwohngebäude.

Abbildung 50 zeigt die kumulierten Gesamtinvestitionen sowie die durchschnittlichen Investitionen pro Sanierungsmaßnahme im Gebäudebestand gegliedert nach Gebäudekategorie. Im Neubaubereich werden nur die zusätzlichen Investitionen der Dämmung eingerechnet.



EZFH: Ein- und Zweifamilienhaus, RH: Reihenhaus; KMFH: Kleines Mehrfamilienhaus MMFH: Mittleres Mehrfamilienhaus, GMFH: Großes Mehrfamilienhaus, NWG: Nichtwohngebäude

Abbildung 50: Kumulierte und durchschnittliche Investitionen für Effizienzmaßnahmen auf Vollkostenbasis im Frozen-Policy-Szenario

Investitionen und Marktanteile der Wärmeversorgungssysteme

Insgesamt werden in der Modellsimulation von 2008 bis 2020 10,9 Millionen Wärmeversorgungssysteme installiert, was einer durchschnittlichen Heizungstauschrate von 3,6 Prozent pro Jahr entspricht. Den größten Anteil mit rund 60 Prozent der neu installierten primären Wärmeversorgungssysteme weisen Erdgaskessel auf (Abbildung 51). Insgesamt werden 1,7 Millionen Solarthermieanlagen bis 2020 installiert, womit bei 16 Prozent der Installationen Solarthermie als sekundäres Wärmeversorgungssystem gewählt wird. Der Anteil primärer EE-Wärmeversorgungssysteme an den installierten Anlagen beträgt 23,7 Prozent inklusive den Anschlüssen an die biogene Nahwärmeversorgung. Von den installierten Biomassekesseln sind 73 Prozent automatisch beschickte Holzpellets- oder Hackschnitzel-Zentralheizungskessel, die übrigen sind handbeschickte Scheitholzvergaserkessel. Der Zubau an Holzpelletkessel von insgesamt 375 Tausend bis 2020 entspricht dabei einer Verdreifachung des Anlagenbestandes des Jahres 2008 (vgl. DEPV 2009). Neben den Zentralheizungskesseln werden

insgesamt 220 Tausend Biomasse befeuerte Einzelraumheizsysteme installiert. Allerdings ist die Installation eines Einzelraumheizsystems im Modell auf die Referenzgebäude ohne zentrales Wärmeverteilsystem beschränkt. Bis 2020 werden im *Frozen-Policy*-Szenario rund 863 Tausend Wärmepumpen installiert, wobei 90 Prozent davon Erdwärmepumpen sind. Der geringe Anteil von Luftwärmepumpen entspricht nicht der Marktentwicklung der vergangenen Jahre, die einen steigenden Anteil Luftwärmepumpen verzeichnet. Es ist zu vermuten, dass das Modell den Anteil der Erdwärmepumpen gegenüber Luftwärmepumpen überschätzt, da existierende technische Restriktionen für Sondenbohrungen und Verfügbarkeit von Freiflächen für Erdwärmekollektoren nicht ausreichend berücksichtigt werden.

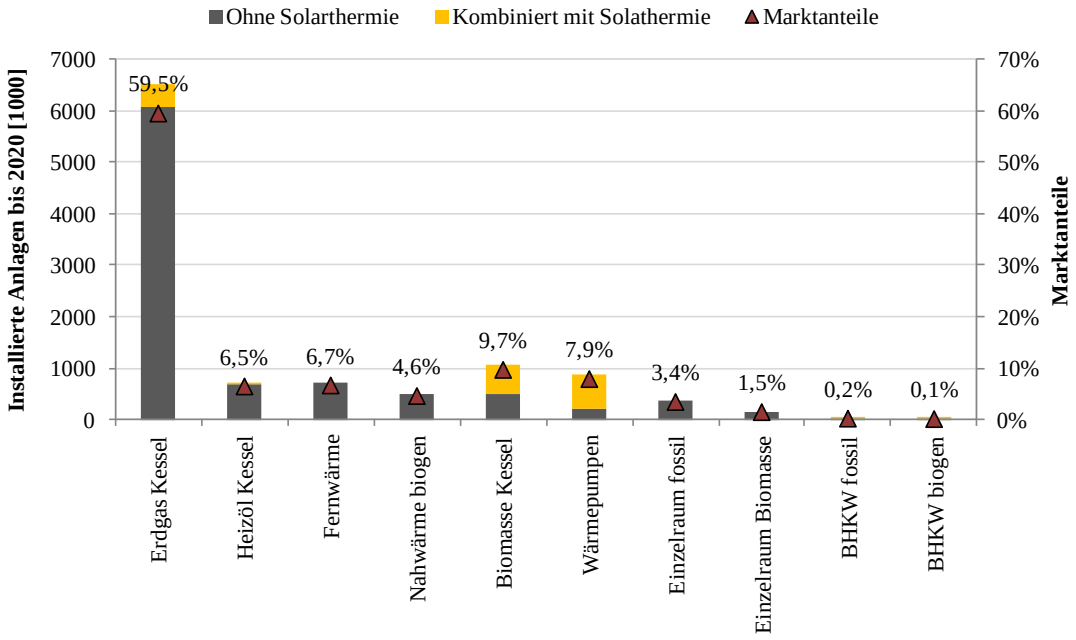


Abbildung 51: Installierte Wärmeversorgungssysteme bis 2020

Die kumulierten Marktanteile primärer Wärmeversorgungssysteme gegliedert nach den im Modell definierten Investorenagenten werden in Abbildung 52 dargestellt. Biomassekessel und Wärmepumpen werden überwiegend in der Klasse der *Eigentümer-Eigennutzer* installiert, insbesondere durch den Investoragent *Überzeugter Energiesparer*, der fast ausschließlich EE-Wärmetechnologien installiert. Bei den anderen Investorenagenten haben Erdgaskessel jeweils den höchsten Marktanteil. Eine heterogene Verteilung der Markanteile fossiler Technologien zeigt sich bei den Investorenagenten, die eine Instandhaltungsstrategie verfolgen – *Unreflektierten Instandhalter* und *Eigentümergemeinschaften* – und in ihrer Entscheidung neben den Investitionen auch die Ähnlichkeit zum existierenden Wärmeversorgungssystem einbeziehen. Auch ist bei diesen Investoragenten der Anteil der Nah- und Fernwärme mit zusammen 26 bzw.

31 Prozent verhältnismäßig hoch, da diese Optionen in der Regel mit den geringsten Investitionen verbunden ist und in jeweils in unterschiedlichen Energieträger Regionen zur Verfügung stehen.

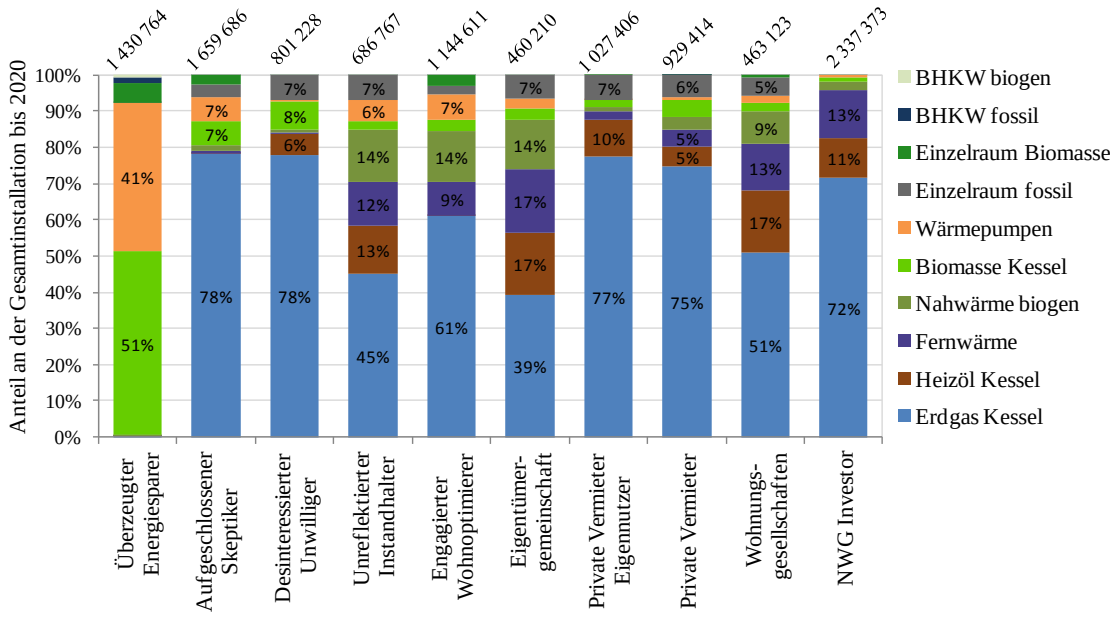


Abbildung 52: Kumulierte Marktanteile der primäre Wärmeversorgungssysteme bis 2020 gegliedert nach Investorenagenten

Abbildung 53 zeigt ergänzend dazu die jeweiligen Anteile der Investorenagenten an den Gesamtinstallationen der einzelnen Technologien. Rund 45 Prozent der Installationen von Erdgaskesseln wird durch die Investorenagenten in der Klasse der *Eigentümer Selbstnutzer* durchgeführt. Die installierten Heizölkessel werden zu einem größeren Anteil in Mehrfamilienhäuser durch die Investorenagenten *Wohnungsgesellschaften und Eigentümergemeinschaften* sowie in Nichtwohngebäuden installiert. Wärmpumpen und Biomassekessel werden überwiegend in Ein- und Zweifamilienhäusern installiert mit den größten Anteilen bei den *Überzeugten Energiesparer.* Die geringe Anzahl an installierten BHKWs entfällt zu 90 Prozent ebenfalls auf den *Überzeugten Energiesparer.* Die Installation von Solarthermieanlagen wird ebenfalls zu 90 Prozent in der Klasse der *Eigentümer Selbstnutzer* durchgeführt, allerdings durch unterschiedliche Investorenagenten.

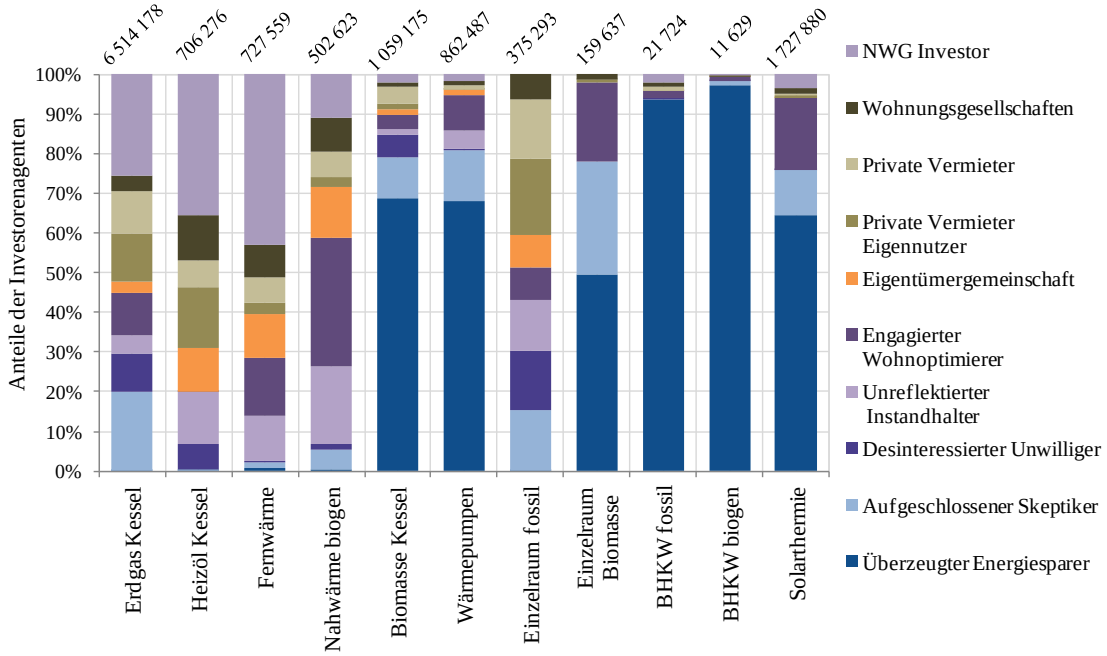


Abbildung 53: Anteile der einzelnen Investorenagenten an den Gesamtinstallationen bis 2020 je Technologie

Mit den installierten Wärmeversorgungssystemen sind bis zum Jahr 2020 Investitionen von insgesamt 101 Milliarden Euro verbunden (Abbildung 54). Investitionen für fossile Wärmeversorgungssysteme belaufen sich auf 56,1 Milliarden Euro, 23,7 Milliarden Euro primäre EE-Wärmeversorgungssysteme und 21,1 Milliarden Euro auf Solarthermieanlagen.

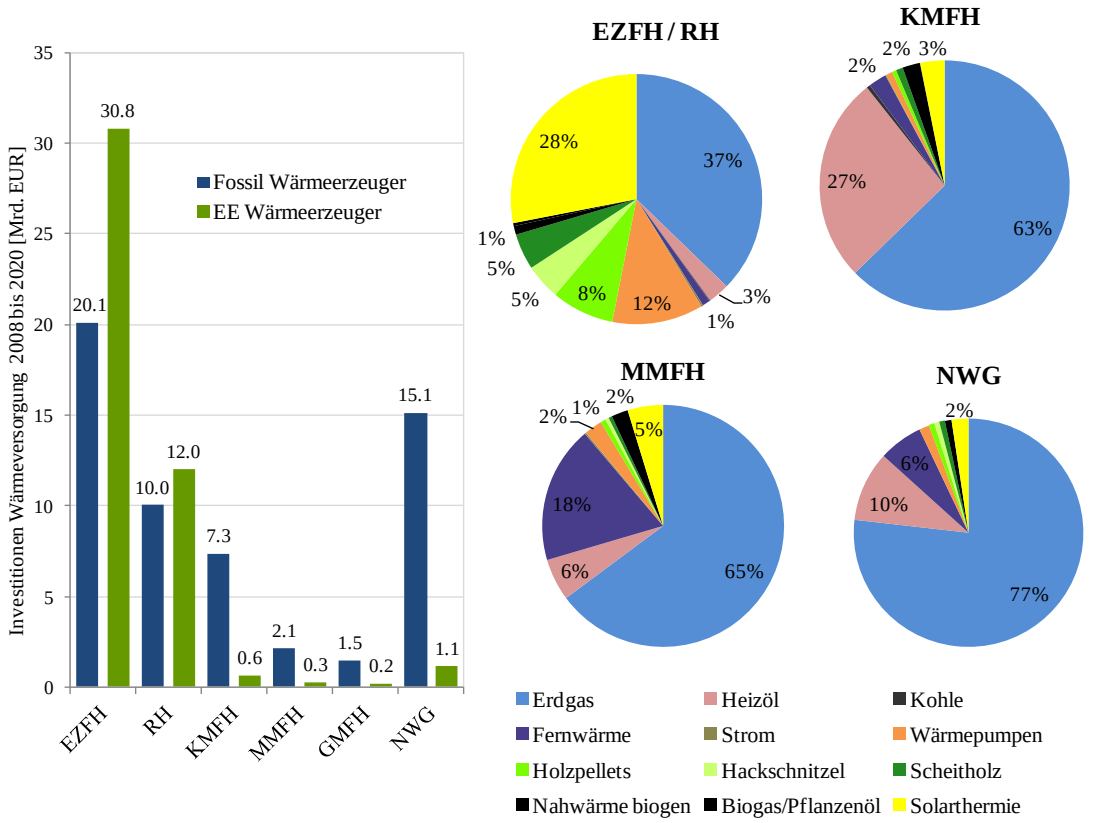


Abbildung 54: Investitionen in die Wärmeversorgungen 2008 bis 2020

Politikkosten: Investitionszuschüsse

Die Politikkosten im *Frozen-Policy-Szenario* setzen sich aus den finanziellen Zuschüssen zur Gebäudesanierung und zum energieeffizienten Neubau sowie für die Wärmeversorgungstechnologien zusammen. Für die energetische Sanierung von Bestandsgebäuden weisen die Modellergebnisse bis 2020 insgesamt 11 Milliarden Euro und für energieeffiziente Neubauten 5,2 Milliarden Euro aus. Der Vergleich der gewährten Zuschüsse mit den vorgegebenen Budgets zeigt, dass letztere in fast allen Jahren ausgeschöpft werden (Abbildung 55). Im Modell werden nicht ausgeschöpfte Zuschüsse in das nächste Simulationsjahr übertragen, womit eine Mittelübertragung in das nächste Haushaltsjahr abgebildet wird. Deutlich wird dieser Zusammenhang in Zeiträumen 2009 bis 2012 und 2018 bis 2020.

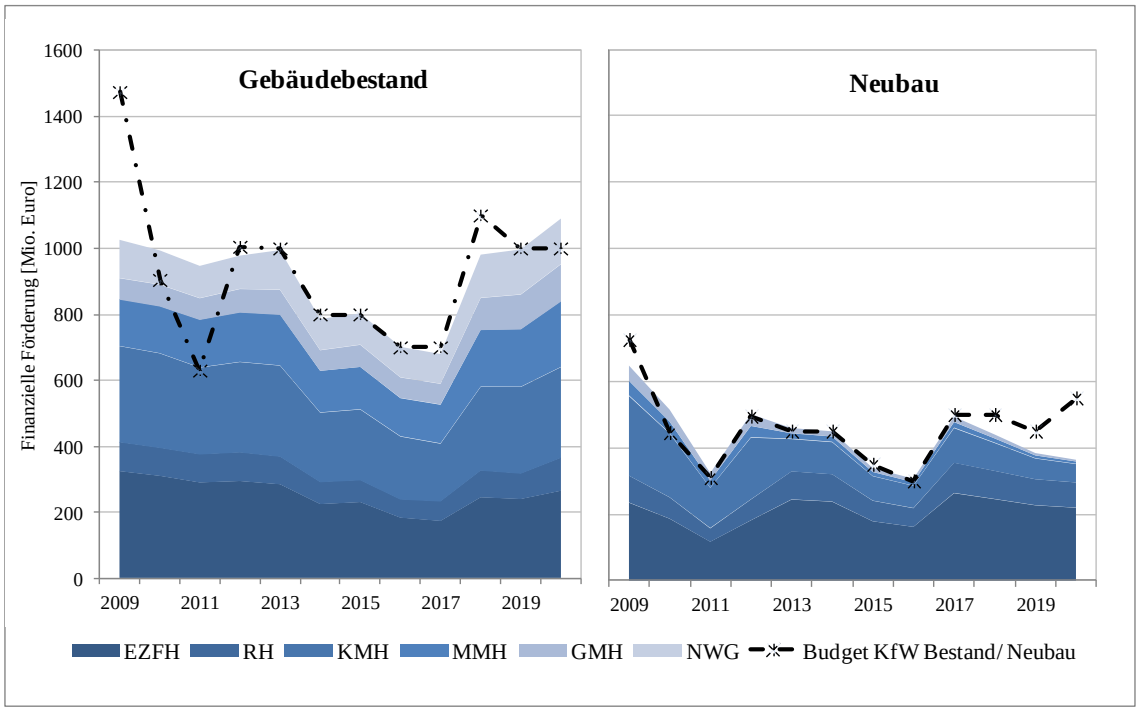


Abbildung 55: Öffentliche Investitionszuschüsse der KfW-Programme zu Gebäudesanierung und effizientem Neubau im Frozen-Policy-Szenario

Abbildung 56 zeigt die Entwicklung der Investitionszuschüsse für die EE-Wärmeversorgung durch das *Marktanreizprogramm* sowie die Zuschüsse für fossile Brennwertkessel im Rahmen der Einzelmaßnahmenförderung der *KfW*-Programme. Im Rahmen des *Marktanreizprogrammes* werden von 2008 bis 2020 insgesamt 2,6 Milliarden Euro an Investitionszuschüssen für EE-Wärme-Technologien vergeben. Die Investitionszuschüsse an fossile Wärmeerzeuger belaufen sich im gleichen Zeitraum auf 2,1 Milliarden Euro. Das Budget des *Marktanreizprogrammes* wird bis 2012 durch die Nachfrage nicht ausgereizt, während die gewährten Zuschüsse im Zeitraum 2013 bis 2020 durch die vorgegebenen Budgets beschränkt werden.

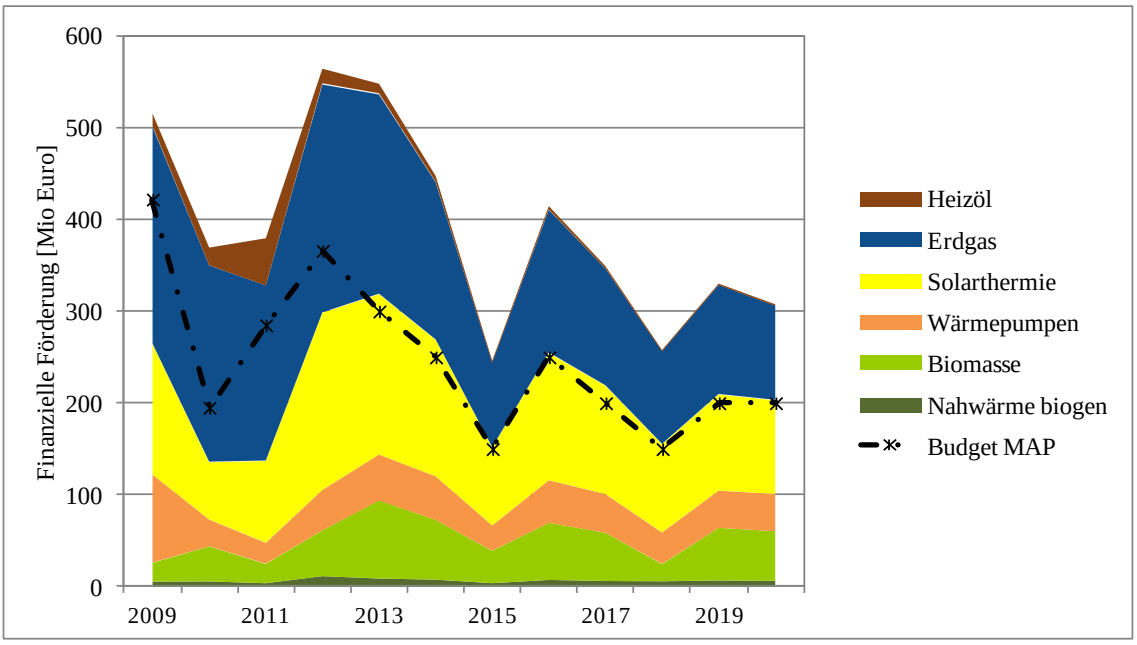


Abbildung 56: Öffentliche Investitionszuschüsse in die Wärmeversorgung

6.4.2 Politikszenarien: Ordnungsrecht

Die Modellergebnisse für das Maßnahmenbündel Ordnungsrecht zeigen unterschiedliche Resultate hinsichtlich der Wirkung der einzelnen Politikvarianten. Abbildung 57 vergleicht die Ergebnisse mit denen des *Frozen-Policy*-Szenarios hinsichtlich des Rückgangs des Wärmeendenergiebedarfs, dem Ausbau der Erneuerbaren Energien und der damit verbundenen Zielerreichung. Die Ergebnisse zeigen, dass durch die beschlossene Verschärfung der *EnEV* für den Neubau (*Ordnungsrecht 01*) eine vergleichsweise geringe Endenergieeinsparung von nur 600 GWh pro Jahr bis zum Jahr 2020 realisiert werden kann. Durch die Einbeziehung des Gebäudebestandes – Varianten 02 und 03 – werden hingegen zusätzlich über 8 TWh pro Jahr eingespart. Den zusätzlichen Effekt von informatorischen und Vollzugsmaßnahmen zur Einhaltung des Ordnungsrechts zeigt der Vergleich der Ergebnisse der Varianten *Ordnungsrecht 03 und Ordnungsrecht 04*. Durch die Erhöhung der *Compliance-Rate* der Investorenagenten erhöht sich die jährliche Einsparung um weitere 4 TWh in Variante 04, womit bis 2020 ein Rückgang des Wärmeendenergiebedarfs um 12,9 TWh pro Jahr gegenüber dem *Frozen-Policy*-Szenario erreicht werden kann. Der Rückgang reicht allerdings in allen Varianten nicht aus, um das „20-Prozent"-Ziel des Energiekonzepts zu erreichen.

Die Ausweitung der Nutzungspflicht auf den Gebäudebestand zeigt deutliche Wirkung auf den Ausbau von EE-Wärme, sofern der Auslösetatbestand der Wechsel des Wärmeversorgungssystems ist. Das EE-Wärme-Ziel wird in den Politikszenarien *Ord-*

nungsrecht 03 und *Ordnungsrecht 04* erreicht, obwohl in der Modellsimulation bei diesen Varianten eine um vier Jahre längere durchschnittliche Betriebsdauer der Wärmeversorgungssysteme unterstellt wird, um den möglichen Attentismus aufgrund der Nutzungspflicht abzubilden. Die Wirkung einer Ausweitung der Nutzungspflicht mit Auslösetatbestand „grundlegende Gebäudesanierung“ in der zweiten Variante ist hingegen vergleichsweise gering und das EE-Wärme-Ziel wird nicht erfüllt.

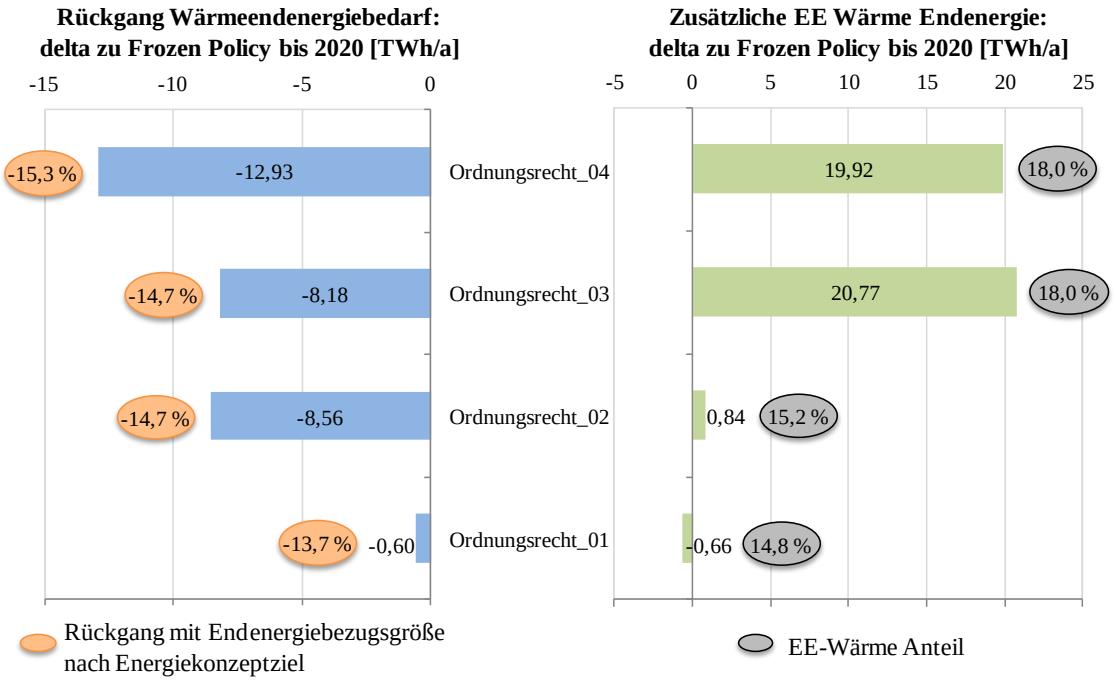
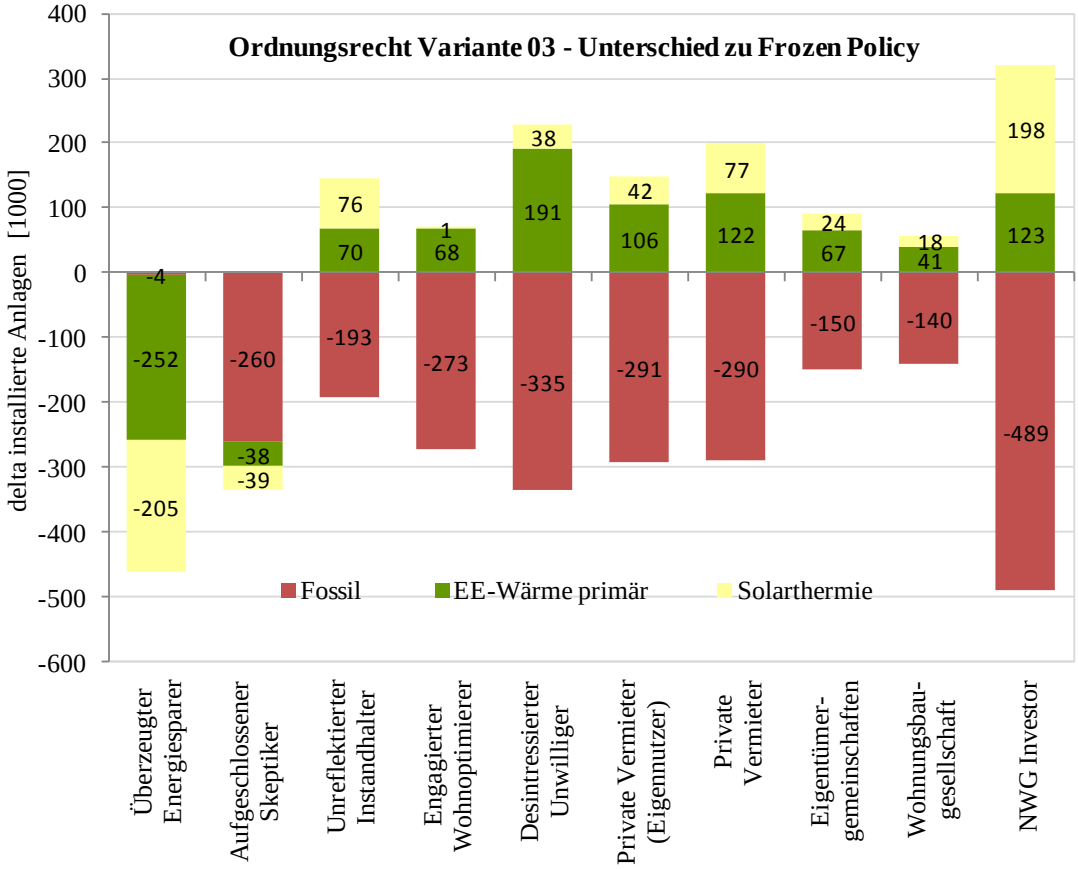


Abbildung 57: Ordnungsrecht: Rückgang Wärmeendenergie und EE-Wärme im Vergleich zu *Frozen Policy*

Abbildung 58 zeigt die Differenz der installierten Anlagen gegliedert nach Investorenagenten und Technologiegruppen für die Variante *Ordnungsrecht 03.* Insgesamt werden unter der Annahme eines längeren Betriebs vorhandener Wärmeversorgungssysteme rund 1,7 Million weniger Installationen im Vergleich zum *Frozen-Policy*-Szenario durchgeführt. Der Vergleich der Installationszahlen nach Investorenagenten zeigt, dass dies in einem Rückgang der EE-Wärme-Installationen bei den Akteuren resultiert, die bereits im *Frozen-Policy*-Szenario einen signifikanten Anteil an EE-Wärme-Installationen durchführen (*Überzeugter Energiesparer, Aufgeschlossener Skeptiker)*. Bei den anderen Investorenagenten hingegen überwiegt die Wirkung der Nutzungspflicht, so dass absolut deutlich mehr EE-Wärmeversorgungssysteme bis 2020 im Vergleich zum *Frozen-Policy*-Szenario installiert werden. Die Auswirkung eines längeren Betriebes bestehender Wärmeversorgungssysteme auf den Endenergiebedarf ist hingegen sehr

gering, wenn Effizienzmaßnahmen an der Gebäudehülle wie in diesem Maßnahmenbündel ebenfalls adressiert werden (Abbildung 57)[84].



EE-Wärme primär: primäres Wärmeversorgungssystem mit EE

Abbildung 58: Differenz der bis 2020 installierten Anlagen zum *Frozen-Policy*-Szenario bei Ausweitung der EE-Wärme-Nutzungspflicht

6.4.3 Politikszenarien: Haushaltsabhängige Förderung

Im Vergleich zu den ambitionierten Ordnungsrechtsvarianten ist die Wirkung einer Aufstockung der haushaltsabhängigen öffentlichen Förderung gering. Auch zielgruppenspezifische Maßnahmen, mit denen Informationsdefizite reduziert und bessere Kreditzugangsmöglichkeiten geschaffen werden (Variante 3), erzielen kaum zusätzliche Wirkung hinsichtlich der Reduktion des Endenergiebedarfs und des Ausbaus von EE-

[84] Der geringere Endenergierückgang in der Variante *Ordnungsrecht 02* gegenüber *Ordnungsrecht 01* aus Abbildung 57 ist nur teilweise auf den längeren Betrieb bestehender Wärmeversorgungssysteme zurückzuführen. Die höhere Anzahl installierter Biomassekessel, die einen niedrigeren Wirkungsgrad als fossile Brennwertkessel aufweisen, führt ebenfalls zu einem Anstieg des Endenergiebedarfs gegenüber der zweiten Variante.

Wärme. Die Ergebnisse zeigen jedoch auch, dass eine Fokussierung der finanziellen Förderung – Varianten 02 und 03 – eine höhere Wirkung bei geringerem Einsatz öffentlicher Mitteln erzielen kann als eine pauschale Erhöhung der spezifischen Fördersätze und der budgetären Ausstattung der Instrumente.

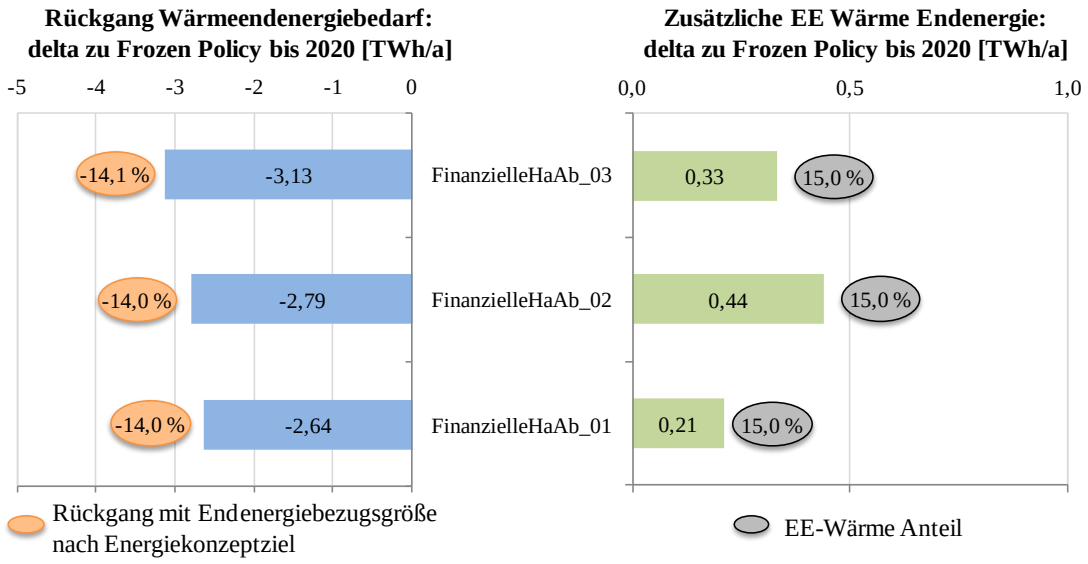


Abbildung 59: Haushaltsabhängige Förderung: Rückgang Wärmeendenergie und EE-Wärme im Vergleich zu Frozen Policy

Die bereitgestellten Fördermittel für Energieeffizienzmaßnahmen im Gebäudebestand und Neubau betragen im Simulationszeitraum durchschnittlich 2,39 Milliarden Euro pro Jahr in Variante 01, während in den Varianten mit Fokussierung der Fördermittel 1,99 bzw. 2,14 Milliarden Euro pro Jahr zur Verfügung gestellt werden. Der Vergleich der zusätzlich induzierten Investitionen mit den zusätzlich eingesetzten Fördermitteln gegenüber dem *Frozen-Policy*-Szenario verdeutlicht jedoch die hohen Mitnahmeeffekte in allen drei Ausgestaltungsvarianten (Abbildung 60, Abbildung 61). Ohne eine Fokussierung der Fördermittel auf den Gebäudebestand übersteigen die zusätzlichen ausgezahlten Investitionszuschüsse die zusätzlich induzierten Investitionen sogar deutlich. Damit fließen einerseits die zusätzlichen Fördermittel zum großen Teil an die Investoren, die ohnehin eine energetische Investition durchgeführt hätten, anderseits reicht die Höhe der Zuschüsse nicht aus, um neue Investorengruppen in größerem Umfang zu erschließen. Der Vergleich zwischen zusätzlichen Investitionen und Zuschüssen bei den Wärmeversorgungssystemen bestätigt ebenfalls die hohen Mitnahmeeffekte durch eine Erhöhung der finanziellen Förderung. Abbildung 61 verdeutlicht zudem die mögliche Einsparung finanzieller Mittel durch Fokussierung auf EE-Wärme und Abschaffung der Förderung konventioneller, dem Marktstandard entsprechenden Technologien, so wie es im derzeitigen Förderinstrumentarium der Fall ist (vgl. 3.3.5).

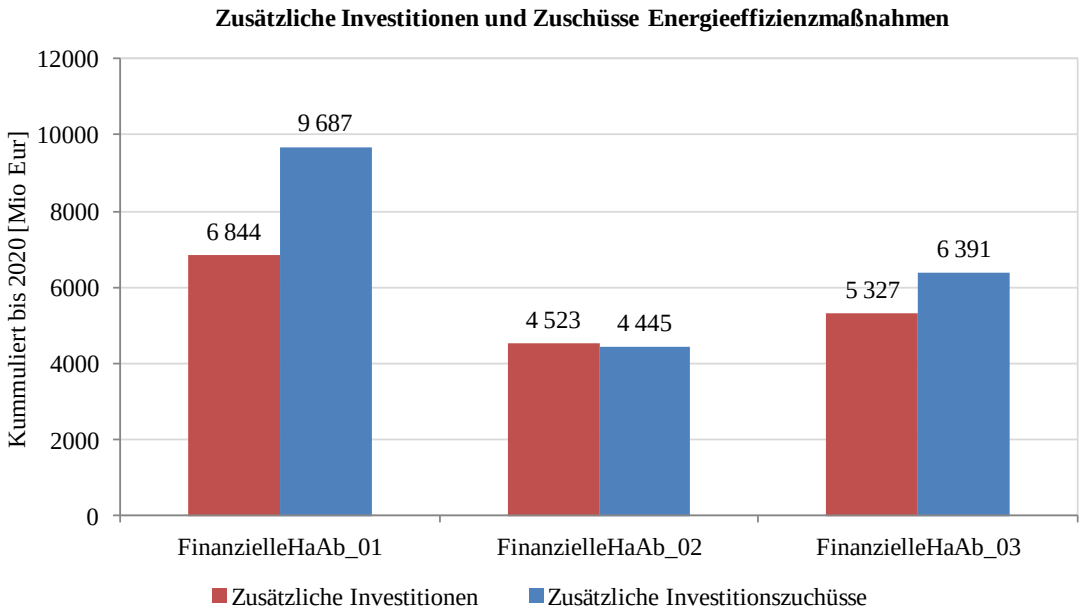


Abbildung 60: Zusätzlich induzierte Investitionen und zusätzliche Fördermittel in Energieeffizienzmaßnahmen im Vergleich zum *Frozen-Policy*-Szenario

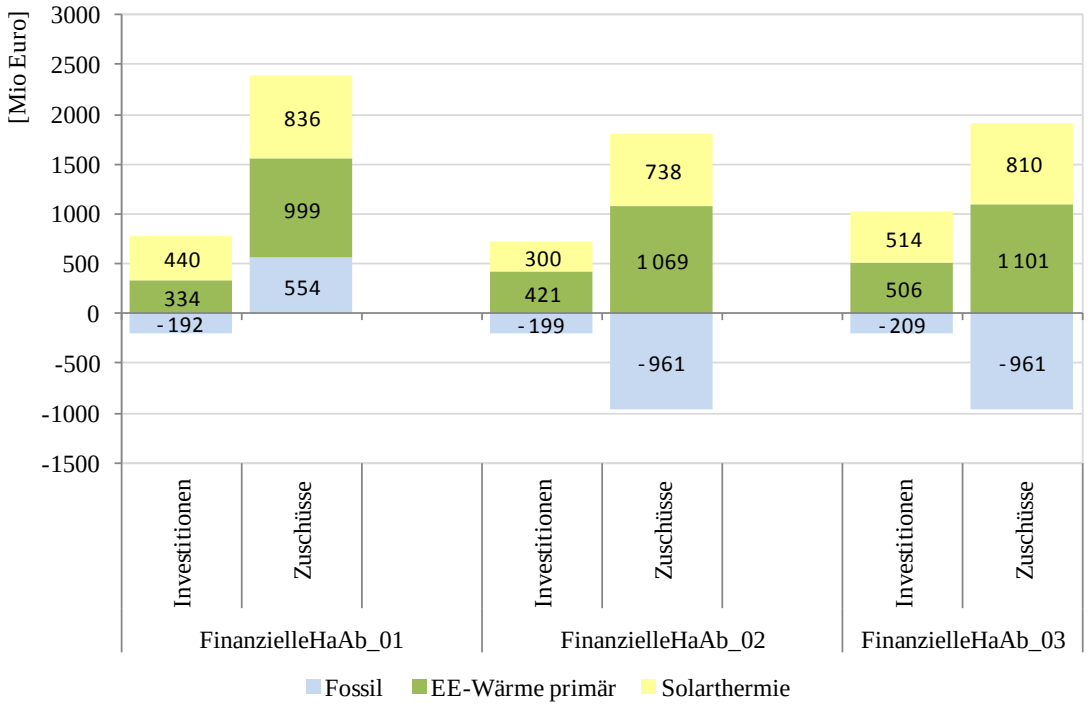


Abbildung 61: Differenz der kumulierten Investitionen und Zuschüsse in EE-Wärmetechnologien im Vergleich zum *Frozen-Policy*-Szenario

In Variante 01 mit Aufstockung der Förderung und Beibehaltung der Zuschüsse für fossile Technologien werden bis 2020 durchschnittlich 1,16 Milliarden Euro pro Jahr an Investitionszuschüssen für die Wärmeversorgung ausgezahlt, während in den Varianten 02 und 03 mit rund 940 Millionen Euro pro Jahr an Investitionszuschüssen ein höherer EE-Wärme-Zubau resultiert.

6.4.4 Politikszenarien: Haushaltsunabhängige Förderung

Abbildung 62 zeigt den Vergleich der Wirkungen der unterschiedlichen Politikvarianten im Maßnahmenbündel *haushaltsunabhängige Förderung*. Hinsichtlich des Rückgangs des Wärmeendenergiebedarfs unterscheiden sich die ersten drei Varianten nur geringfügig, da die gleiche Ausgestaltung der finanziellen Förderinstrumente für Energieeffizienzmaßnahmen unterstellt wird.

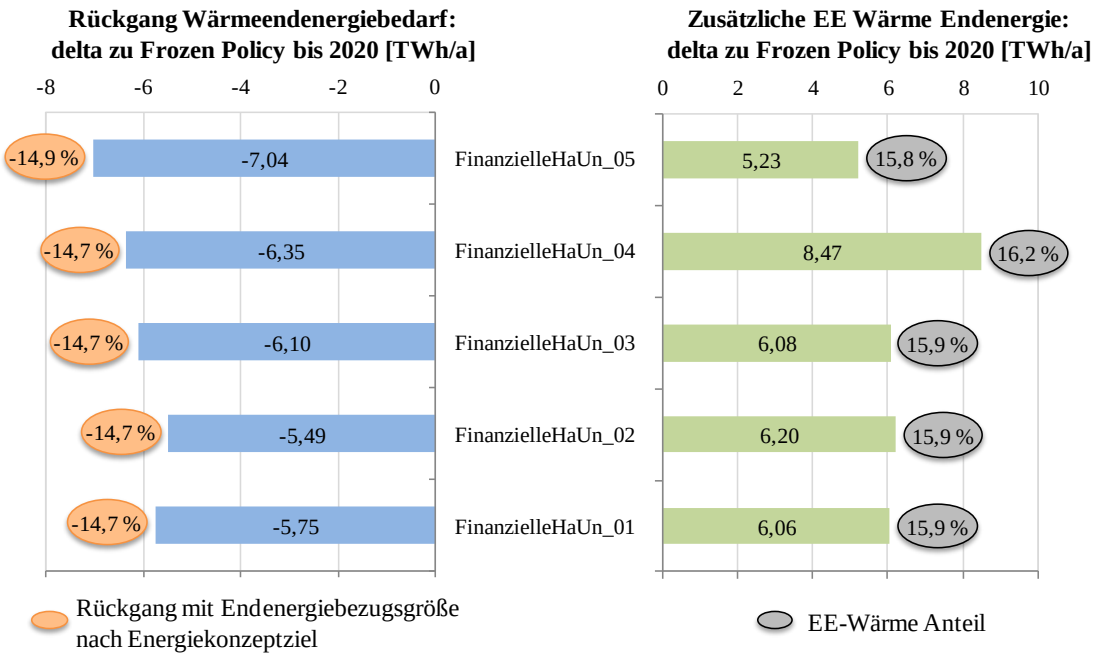


Abbildung 62: Haushaltsunabhängige Förderung: Rückgang Wärmeendenergie und EE-Wärme im Vergleich zu *Frozen Policy*

Durch zusätzliche Adressierung investorenspezifischer Hemmnisse bei der Finanzierung – Varianten 04 und 05 – werden in der Modellsimulation zwar mehr Effizienzmaßnahmen durchgeführt, der Effekt ist jedoch im Zeitraum von 2014 bis 2020 sehr gering. Wie in den anderen untersuchten Maßnahmenbündeln wird das „20-Prozent-Energieeffizienzziel“ jedoch auch hier in allen Ausgestaltungsvarianten verfehlt. Ebenso wie bei den Szenarien der haushaltsabhängigen Förderung zeigen die Ergebnisse hohe Mitnahmeeffekte durch die Erhöhung der spezifischen Zuschüsse. Durch den

Wegfall einer Budgetbegrenzung führt dies im Gegensatz zur haushaltsabhängigen Förderung nicht dazu, dass ambitionierte Effizienzmaßnahmen aufgrund einer Mittelauschöpfung – durch die Allokation auf die Investoren, die auch ohnehin investiert hätten – nicht durchgeführt werden. Die durchschnittlichen bereitgestellten Fördermittel betragen im Simulationszeitraum je nach Variante zwischen 3,5 und 4,1 Milliarden Euro pro Jahr.

Prämien- und *Portfoliomodell* induzieren einen EE-Wärme-Ausbau in ähnlicher Größenordnung. Bei der Kombination der Fördermodelle mit informatorischen Maßnahmen können allerdings nur im *Portfoliomodell* weitere Akteure erschlossen werden. In Variante 05 – *Prämienmodell* mit informatorischen Maßnahmen – resultiert sogar eine geringere EE-Wärme-Bereitstellung als in Variante 1, was allerdings auf den insgesamt stärkeren Rückgang des Endenergiebedarfs durch höhere Sanierungsaktivität zurückzuführen ist. Der Vergleich der Politikvarianten anhand der zusätzlich installierten Anlagen bestätigt, dass in Variante 05 insgesamt mehr erneuerbare Wärmeversorgungssysteme als in Variante 01 zugebaut werden (Abbildung 63).

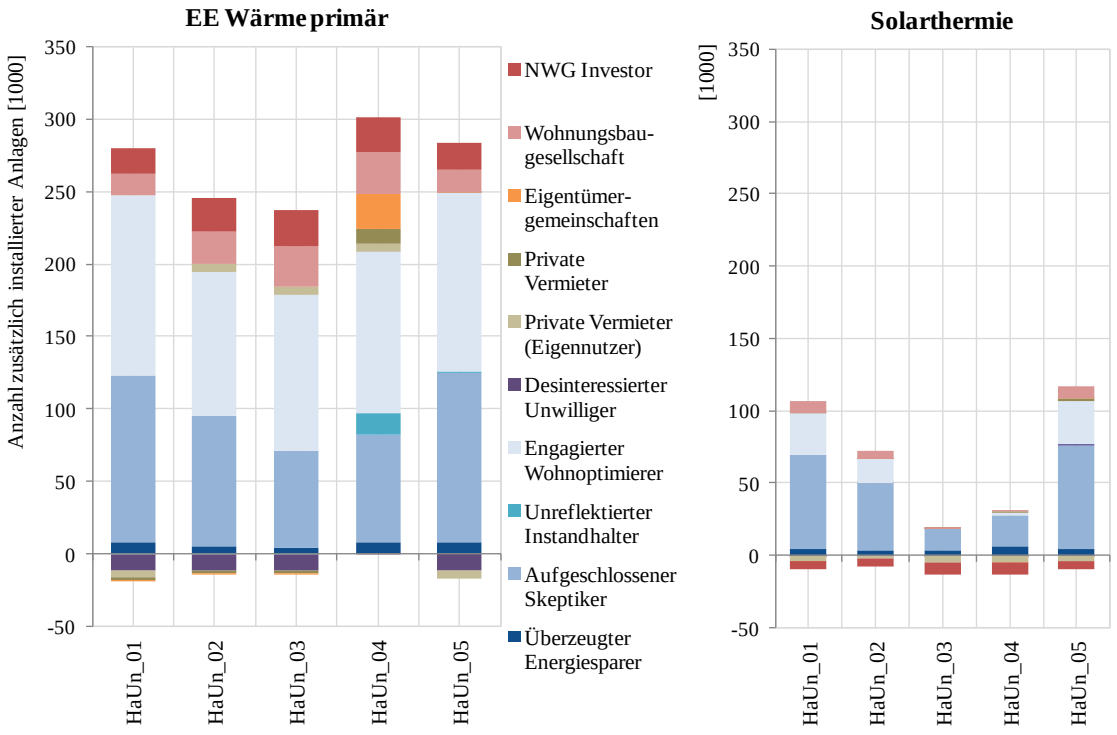


Abbildung 63: Anzahl zusätzlicher EE-Wärmeversorgungssysteme im Vergleich zu Frozen Policy

In den beiden *Portfoliomodell*-Varianten ist der Zubau gemessen an der Anzahl der Anlagen geringer. Allerdings werden mehr Investoren in den Klassen *Wohnungsbaugesellschaften, Private Vermieter* und *Nichtwohngebäude* für die Installation von primä-

ren Wärmeversorgungssystemen erschlossen, mit denen aufgrund der Größe der Gebäude eine höhere spezifische Wärmelast pro Maßnahme verbunden ist. Durch informatorische Maßnahmen investieren in Variante 04 die Investorenagenten *Eigentümergemeinschaften* und *Unreflektierte Instandhalter* in EE-Wärmesysteme, die in den anderen Varianten keine zusätzlichen Installationen durchführen. Die Auswirkung informatorischer Maßnahmen beim *Prämienmodell* zeigt sich hingegen in einer höheren Anzahl installierter Solarthermieanlagen, während primäre EE-Wärmeversorgungssysteme im gleichem Umfang wie in *Varianten 01* ohne informatorische Maßnahmen installiert werden. Im *Portfoliomodell* mit technologieneutraler Quote hingegen werden die spezifischen Fördersätze endogen auf Grundlage der Technologie mit den geringsten Jahresvollkosten bestimmt und in Abhängigkeit der Quotenerfüllung sukzessive erhöht (vgl. 5.5.4.) Da Solarthermie die höchsten Jahresvollkosten mit Bezug auf die bereitgestellte EE-Nutzenergie aufweist, werden spezifische Fördersätze wie im *Marktanreizprogramm* oder im *Prämienmodell* für diese Technologie nicht erreicht.

Der Umfang der gewährten Investitionszuschüsse in den gerechneten Varianten des *Prämienmodells* und des *Portfoliomodells* werden in Abbildung 64 verglichen. In den *Prämienmodell*-Varianten werden trotz geringerem Zubau an EE-Wärme die meisten Investitionszuschüsse vergeben, wobei der größte Anteil der Förderung in die Solarthermie fließt. Die Verteilung und Höhe der Investitionszuschüsse unterscheidet sich in beiden Varianten des *Prämienmodells* nur geringfügig. Die gesamten Politikkosten der *Portfoliomodell*-Varianten sind allerdings höher unter Berücksichtigung der Strafzahlungen für die Verpflichteten. Die höchsten Kosten resultieren in der Variante mit technologiespezifischer Förderung, was auf die günstigen Gewichtungsfaktoren und damit verbundenen höheren Zuschüsse für die Solarthermie zurückzuführen ist. Abbildung 64 zeigt neben den gewährten Investitionszuschüssen auch die Strafzahlungen und die erreichte Quote für die drei *Portfoliomodell*-Varianten. Die im Mittel niedrigste Quotenerfüllung und damit höchsten Strafzahlungen werden in Variante 03 mit technologieneutraler Quote ohne zusätzliche informatorische Maßnahmen verzeichnet. In der Variante mit technologiespezifischer Gewichtung (*FinanzielleHaUn 02*) resultiert zwar ein niedrigerer EE-Wärme-Zubau, jedoch ist die Quote aufgrund der höheren Gewichtung von Solarthermie durch geringere Wärmemenge zu erreichen. Die höchste Quotenerfüllung bei gleichzeitig niedrigsten Zuschüssen wird in Variante *FinanzielleHaUn 04* realisiert, da hier eine höhere Reichweite des Förderinstruments durch informatorische Maßnahmen unterstellt wird. Mit der Änderung der investoren-

spezifischen Wahrnehmung des Förderinstruments werden pro Jahr durchschnittlich 252 Tausend Investoren mehr erreicht[85].

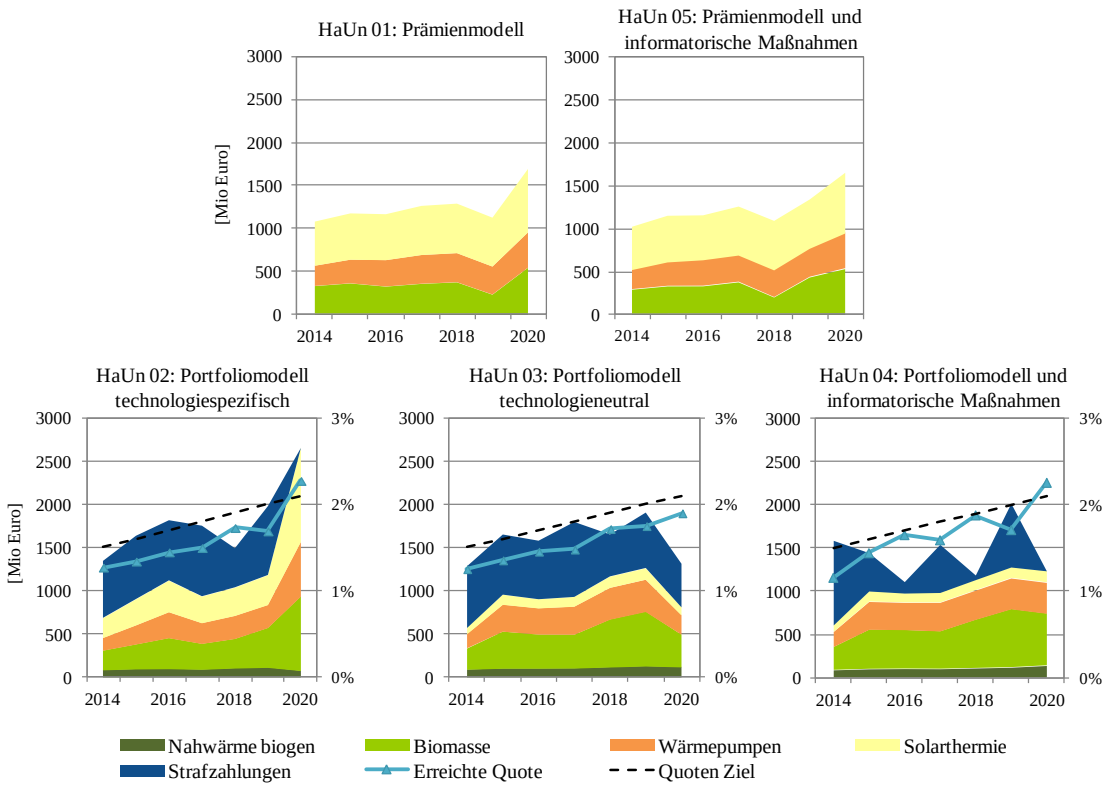


Abbildung 64: Investitionszuschüsse und Strafzahlungen in den gerechneten Varianten des Prämien- und *Portfoliomodells*

Die Politikkosten liegen dabei um 155 Million Euro niedriger, als in der gleichen *Portfoliomodell*-Variante ohne informatorische Maßnahmen.

Allerdings sind diese Maßnahmen in der Realität auch mit Kosten verbunden, die nicht direkt im Modell abgebildet werden. Das Verhältnis zwischen eingesparten Politikkosten und zusätzlich adressierten Akteuren zeigt jedoch die Effizienz und die Relevanz informatorischer Maßnahmen als flankierendes Instrument zum *Portfoliomodell*.[86]

---

85 Die Änderung der Wahrnehmung der Investorenagenten führt dazu, dass mehr Investoren über das Fördersystem informiert sind und dieses bei der Investitionsentscheidung berücksichtigen (vgl. 5.5.4)

86 Die Modellergebnisse schlagen vor, dass auch ohne zusätzliche autonome Informationsverbreitung Ausgaben für Information und Werbung von bis zu 600 Euro pro zusätzlich adressierten Investor immer noch zu niedrigeren Politikkosten führen.

6.5 Bewertung der Szenarienergebnisse

Mit den Modellergebnissen lassen sich die untersuchten Politikinstrumente und Maßnahmenbündel einerseits hinsichtlich ihrer Effektivität, mit Bezug auf die durch die *Energiewende/Energiekonzept* vorgegeben Ziele für den Gebäudebereich bewerten. Anderseits ermöglicht die Analyse eine Beurteilung der Effizienz der untersuchten Instrumente bezüglich der gesamt- und einzelwirtschaftlichen Kosten sowie der Verteilungseffekte.

Effektivität mit Bezug auf die Effizienz- und EE-Wärme Ziele

Die Modellergebnisse zeigen, dass von den untersuchten Politikinstrumenten ordnungsrechtliche Maßnahmen am wirkungsvollsten hinsichtlich des Rückgangs des Wärmeendenergiebedarfs und des Ausbaus EE-Wärme sein können (Abbildung 65). Dies wird jedoch nur erreicht, wenn eine ambitionierte Ausgestaltung der Instrumente unterstellt wird, die auf den Gebäudebestand fokussiert sind. Die Verschärfung der *EnEV* auf den Neubau zeigt bis 2020 effektiv kaum Wirkung, genauso wie die Ausweitung des *EEWärmeG* auf den Gebäudebestand, wenn der Auslösetatbestand auf die grundlegende Sanierung der Gebäude beschränkt ist. Den größten Zubau an erneuerbaren Energien wird durch die EE-Wärme-Nutzungspflicht im Falle des Wärmeversorgungssystemtauschs erreicht. Dies ist auch der Fall, wenn unterstellt wird, dass aus der Verpflichtung der Gebäudeeigentümer ein allgemeiner Attentismus resultiert, der zu einer deutlich geringeren Heizungstauschrate im Gebäudebestand führt.

Die Verbesserung finanzieller Förderinstrumente alleine kann hingegen nicht die gleiche Wirkung erzielen. Die Erhöhung der spezifischen Fördersätze führt insbesondere bei der Wärmeversorgung zu hohen Mitnahmeeffekten. Durch Umstellung auf eine haushaltsunabhängige Finanzierung ohne budgetäre Begrenzung der Fördermittel und gleichzeitige Erhöhung der Fördersätze wird eine doppelt so hohe Energieeinsparung und ein deutlich höherer EE-Wärme-Zubau realisiert. Mit *Prämien-* und *Portfoliomodell* wird in den Varianten ohne informatorische Maßnahmen ein vergleichbarer EE-Wärme-Zubau erreicht. Die Relevanz flankierender Informationsmaßnahmen zeigte sich insbesondere im *Portfoliomodell.* Durch die Erhöhung der über das Förderinstrument informierten Akteure wird ein höherer Zubau bereits bei geringeren Fördersätzen erreicht, womit die Mitnahmeeffekte reduziert werden. Der zusätzliche Effekt im Vergleich zum Prämienmodell mit informatorischen Maßnahmen ist auf die dynamische Anpassung der Fördersätze zurückzuführen, der zu mehr Installationen primärer EE-Wärmeversorgungssysteme führt, während sich der Effekt beim *Prämienmodell* auf zusätzliche Solarthermieanlagen beschränkt. Die Gefahr, dass ohne eine technologiespezifische Förderung der Ausbau auf eine Technologie fokussiert wird, lässt sich

durch die Modellergebnisse zumindest für den Simulationszeitraum nicht bestätigen. Zwar werden weniger Solarthermieanlagen als im *Prämienmodell* installiert, allerdings nicht weniger als im *Frozen-Policy*-Szenario, in dem die Fortschreibung derzeitiger *MAP*-Förderung angenommen wird. Bei der Bewertung der haushaltsunabhängigen Förderung ist zu beachten, dass auch durch eine haushaltsabhängige Förderung eine ähnliche Wirkung erzielt werden könnte, wenn es rechtliche Mechanismen gebe, die eine entsprechend hohe budgetäre Ausstattung der Förderinstrumente im Rahmen des öffentlichen Haushaltes gebe.

Das EE-Wärme-Ziel wird in allen Varianten des Maßnahmenbündels *haushaltsunabhängige Förderung* knapp verfehlt[87]. Eine Überschreitung des Ziels wird nur im Maßnahmenbündel *Ordnungsrecht* bei Ausweitung der Nutzungspflicht in der Variante „Wärmeversorgungssystemtausch erreicht. Das „20-Prozent-Energieeffizienzziel“ wird hingegen in allen Szenarien deutlich unterschritten.

Abbildung 65 fasst noch einmal die Ergebnisse aller Politikszenarien mit Bezug auf die Ziele für den Wärme- bzw. Gebäudebereich zusammen.

[87] In den mengengesteuerten Instrumenten würden mit einer entsprechenden Setzung der spezifischen Strafzahlung die Ziele erreicht werden. Für die in den Szenarien angesetzte Strafzahlung ist jedoch eine realistische, politisch durchsetzbare Größenordnung angenommen worden.

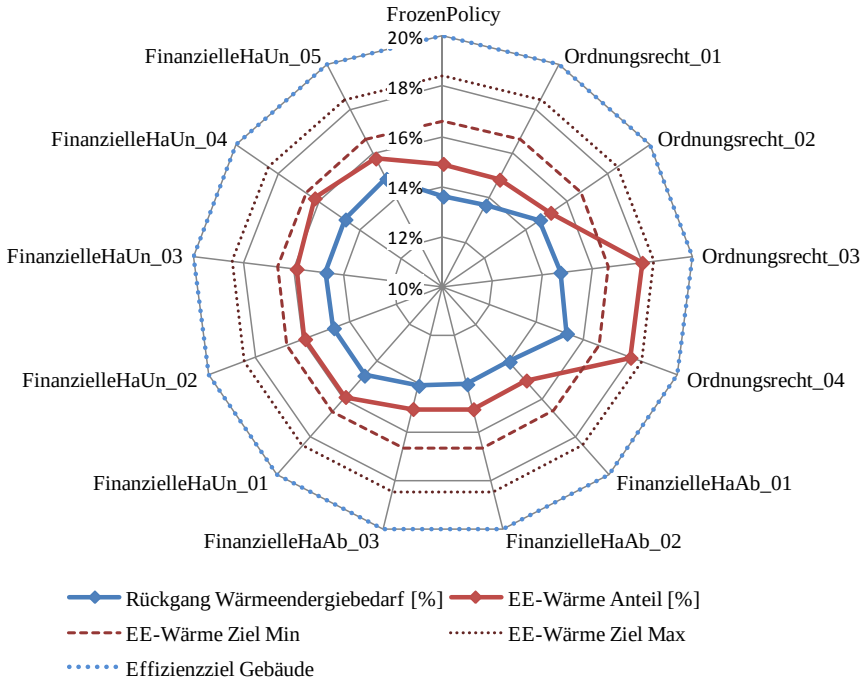


Abbildung 65: Effektivität der untersuchten Maßnahmenbündel hinsichtlich der Energiewendeziele für den Wärmebereich bis 2020

Gesamtwirtschaftliche Kosteneffizienz und Verteilungswirkung

Abbildung 66 zeigt zunächst die Entwicklung der Energie- und Betriebskosten im *Frozen-Policy*-Szenario (rechts) sowie die kumulierte Differenz dazu bis 2020 in den einzelnen Politikszenarien. Die Energie- und Betriebskosten für die Wärmeversorgung des gesamten Gebäudebereichs steigt im *Frozen-Policy*-Szenario von 2008 bis zum Jahr 2020 um rund 1,3 Milliarden Euro auf insgesamt 68,6 Milliarden Euro pro Jahr. Mit der angenommenen Energiepreisentwicklung wird trotz des gesunkenen Wärmeendenergiebedarfs auch in den anderen Politikszenarien kein Rückgang der absoluten Energie- und Betriebskosten gegenüber dem Jahr 2008 realisiert. Die dargestellten Differenzverbrauchskosten[88] der Politikszenarien beschreiben eine einzelwirtschaftliche Perspektive. Dabei sind die Energiepreisumlagen aus der Förderung von EE-Wärme bei den entsprechenden Maßnahmenbündeln beinhaltet, was die vergleichsweise hohen Mehrkosten in den Varianten des Maßnahmenbündels *haushaltsunabhängige Förderung* erklärt. Die niedrigsten Energiekosten resultieren erwartungsgemäß in den

[88] Diese bezeichnen die Differenz der gesamten Energie- und Betriebskosten der Wärmeversorgung im Gebäudebereich zum *Frozen-Policy*-Szenario.

ambitionierten Ausgestaltungsvarianten im Maßnahmenbündel *Ordnungsrecht,* da dabei die größten Energieeinsparungen realisiert werden.

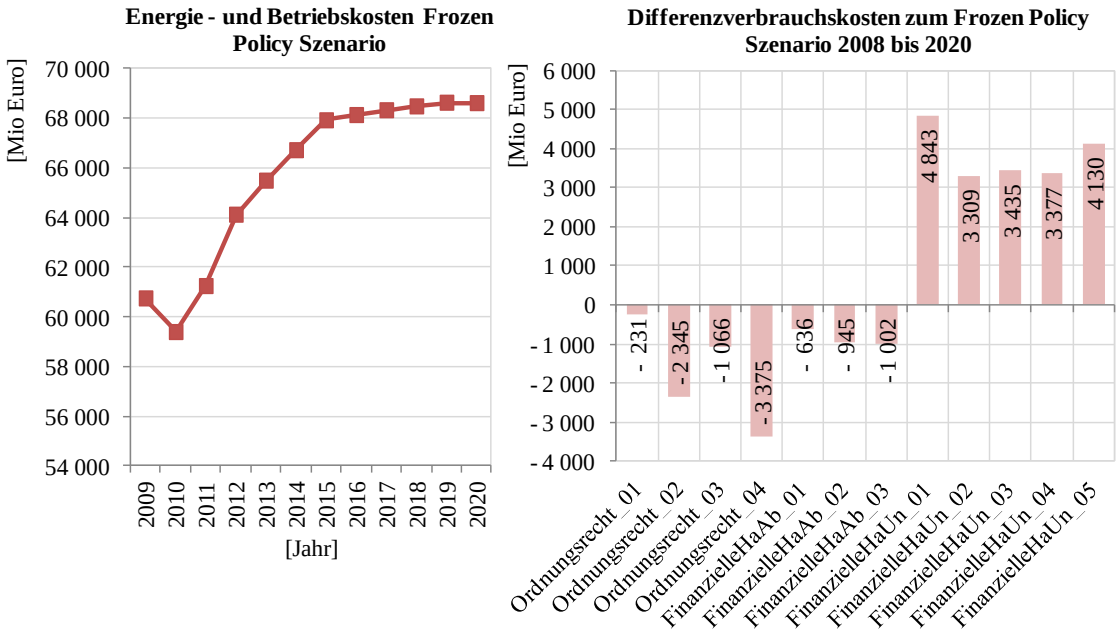


Abbildung 66: Energie- und Betriebskosten des gesamten Gebäudebereichs

Die im Simulationszeitraum erfolgten Investitionen im *Frozen-Policy*-Szenario kumulieren sich auf insgesamt 516 Milliarden Euro (Abbildung 67). Davon sind rund 101 Milliarden Euro Investitionen in die Wärmeversorgung und 415 Milliarden Euro Investitionen in Effizienz- und Instandhaltungsmaßnahmen an der Gebäudehülle. Bis auf die hinsichtlich der politischen Ausgestaltung wenig ambitionierte Variante *Ordnungsrecht 01* werden in allen Politikszenarien deutlich mehr Investitionen realisiert als im *Frozen Policy* Szenario. In den ambitionierten Ordnungsrechtsszenarien werden zwischen 28 und 37 Milliarden Euro zusätzliche Investitionen bis 2020 durchgeführt. Allerdings werden im Bereich der Wärmeversorgung aufgrund der geringeren Austauschrate (vgl. 6.4.2) weniger Investitionen im Umfang von 9,5 Milliarden Euro durchgeführt.

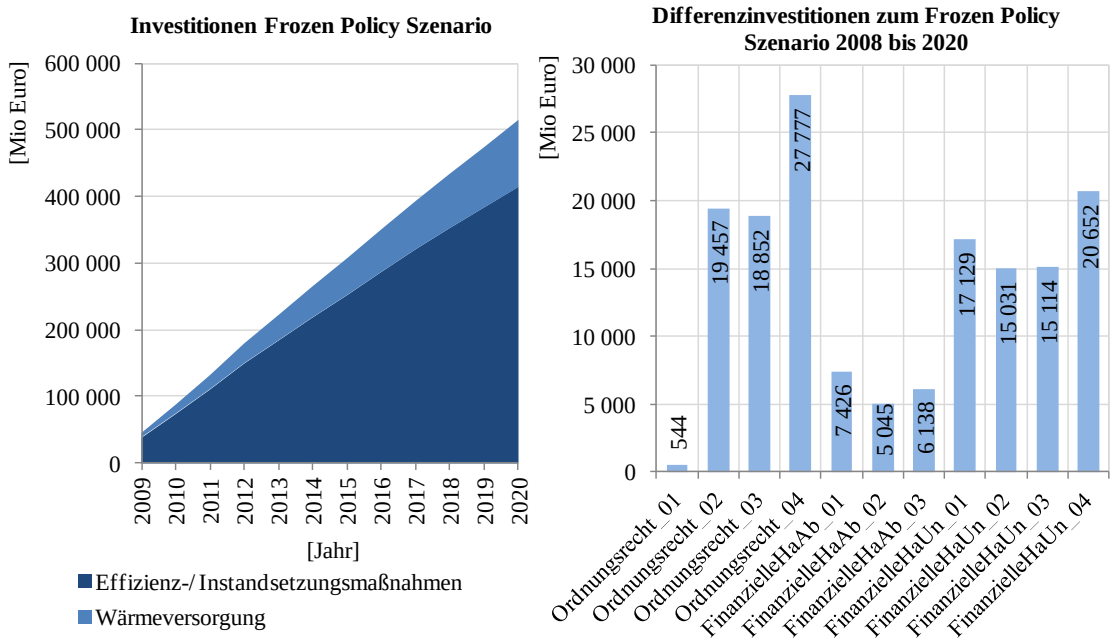


Abbildung 67: Gesamte Investitionen im Simulationszeitraum

Zur Beurteilung der Kosteneffizienz werden aus den dargestellten Ergebnissen der Investitionen sowie den Energie- und Betriebskosten die Differenzkosten für die einzelnen Politikszenarien ermittelt. Die Differenzkosten im Wärmebereich stellen die Mehr- oder Minderkosten dar, die sich aus der Annuität der Investitionen sowie den Verbrauchskosten der Versorgung gegenüber einem Referenzszenario ergeben. Im Gegensatz zu bestehenden Analysen der Differenzkosten erneuerbarer Energien (vgl. Breitschopf et al. 2010, 2011; Nitsch 2007) werden in dieser Arbeit neben den Wärmeversorgungstechnologien auch die Investitionen in Effizienzmaßnahmen und die damit verbundene Minderung der Energiekosten berücksichtigt. Die Differenzkosten der jeweiligen Szenarien ergeben sich dabei aus der Differenz der Gesamtkosten gegenüber dem *Frozen-Policy*-Szenario:

$$DC_{2020}^{Scen} = TC_{2020}^{Scen} - TC_{2020}^{FrozenPolicy} \qquad (54)$$

Zur Berechnung der Gesamtkosten werden die Kapitalwerte der Investitionen als Annuität über die Nutzungsdauer verteilt. Für den Bereich der Wärmeversorgung wird eine einheitliche Nutzungsdauer von 20 Jahren angesetzt, für Maßnahmen an der Gebäudehülle wird mit einer Nutzungsdauer von 40 Jahren gerechnet. Für den Simulationszeitraum 2008 bis 2020 ergeben sich die Gesamtkosten eines Szenarios somit folgendermaßen:

$$TC_{2020}^{Scen} = \sum_{t=2008}^{T=2020} \left(I_{hs,t}^{Scen} \cdot a(N_{hs}) \cdot (T-t) + I_{Eff,t}^{Scen} \cdot a\left(N_{eff}\right) \cdot (T-t) + C_t^{Scen} \right) \quad (55)$$

$$\text{für: } N_{hs}, N_{eff} > (T-t)$$

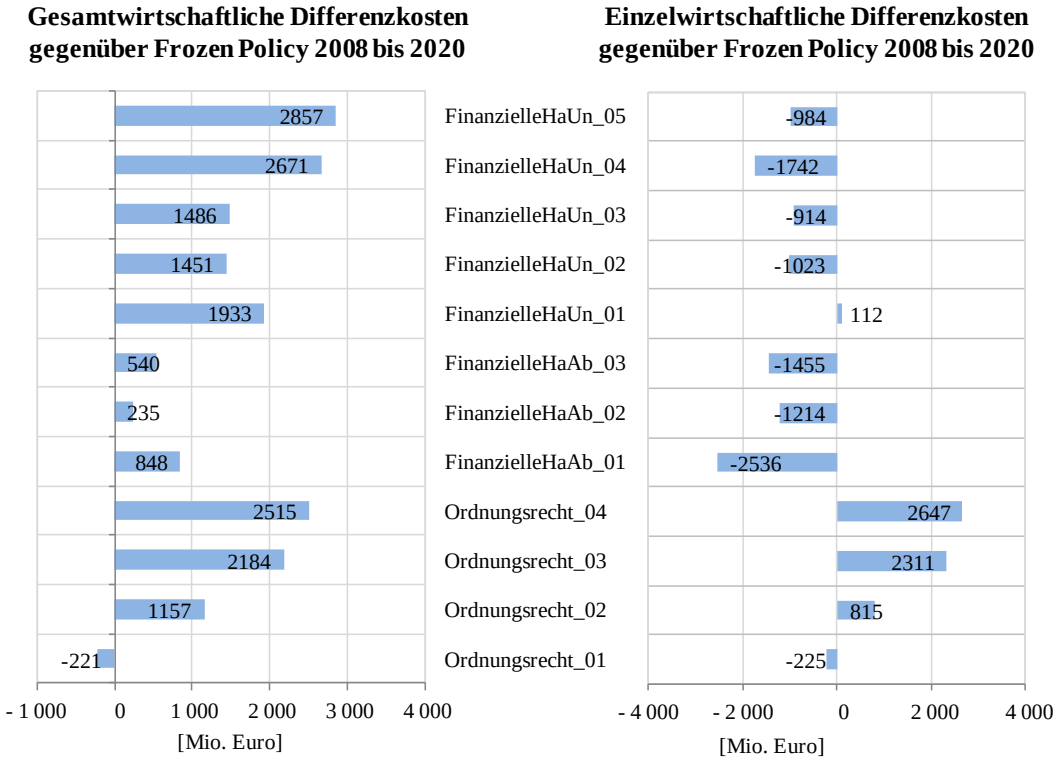
C_t^{Scen}	*Energie- und Betriebskosten der gesamten Wärmeversorgung im Jahr t*
$a(N)$	*Annuitätenfaktor:* $\frac{i}{(1-(1-i)^{-N}}$ *mit* $i = 6$ *Prozent*[89]
N	*Nutzungsdauer hs: 20 Jahre, eff: 40 Jahre*

Abbildung 68 stellt die daraus resultierenden kumulierten Differenzkosten der einzelnen Szenarien innerhalb des Simulationszeitraums vor. Unterschieden wird zwischen der gesamt- und der einzelwirtschaftlichen Perspektive (Breitschopf et al. 2010, 2011). Bei ersterer werden die berücksichtigten Investitionen nicht um die gewährten Investitionszuschüsse gemindert, da die öffentlich finanzierten Fördermaßnahmen nur einen Verteilungseffekt von Investoren auf Steuerzahler darstellen. Bei den umlagebasierten haushaltsunabhängigen Förderinstrumenten für EE-Wärme liegt ein Verteilungseffekt von Investoren auf Endverbraucher vor, da die gewährten Investitionszuschüsse durch den Konsumenten fossiler Brennstoffe getragen werden. Bei der Berechnung der gesamtwirtschaftlichen Differenzkosten werden die Umlagen auf die Energiekosten ebenfalls nicht mit eingerechnet. Um die Relevanz der Verteilungseffekte zu verdeutlichen, werden in Abbildung 68 der systemanalytischen Bewertung die einzelwirtschaftlichen Differenzkosten gegenübergestellt. In dieser werden einerseits die um finanzielle Förderungen geminderten Investitionen berücksichtigt, anderseits fließen die Energiekosten inklusive der Umlagen aus den haushaltunabhängigen Förderinstrumenten bei den entsprechenden Szenarien mit ein.

Die Ergebnisse zeigen, dass alle untersuchten Politikvarianten zu moderaten Mehrkosten aus systemanalytischer Perspektive führen. Zu beachten ist, dass der Betrachtungszeitraum unter der für die Berechnung angesetzten Nutzungsdauer der Technologien und Maßnahmen liegt.

---

[89] Die Berechnung erfolgt mit einem Zinssatz von 6 Prozent in Anlehnung an vergleichbare Berechnungen der Differenzkosten erneuerbarer Energien (Breitschopf et al. 2010; Nitsch 2007).



Gesamtwirtschaftlich: Exklusive Subventionen und Umlage. Einzelwirtschaftlich: Inklusive Subventionen und Umlage

Abbildung 68: Vergleich der gesamt- und einzelwirtschaftlichen Differenzkosten

Die Varianten mit der höchsten Effektivität in den Maßnahmenbündeln *Ordnungsrecht* und *haushaltsunabhängige Förd*erung führen zu Differenzkosten in ähnlicher Größenordnung, wobei die ambitionierten Varianten im *Ordnungsrecht* trotz höherer Effektivität nicht die höchsten Differenzkosten aufweisen.

Neben den hier dargestellten Kriterien der Effektivität und Effizienz sind für die Ausgestaltung eines realpolitischen Maßnahmenbündels jedoch auch die politischen Durchsetzbarkeit und die damit verbundene Akzeptanz der betroffenen Akteure relevant. Der Vergleich der einzelwirtschaftlichen Kosten zeigt, dass aus Sicht der Investoren deutlich höhere Mehrkosten durch die Verschärfung des Ordnungsrechts resultieren. Um die Akzeptanz zu erhöhen, wäre die Kombination von ordnungsrechtlichen Vorgaben bei gleichzeitiger finanzieller Förderung der Standards eine sinnvolle Ergänzung. Die politische Durchsetzbarkeit einer Aufstockung der öffentlich finanzierten Förderprogramme ist sicherlich auch höher als die Einführung eines haushaltsunabhängigen Fördersystems, das die Verpflichtung der Akteure auf Ebene Gas- und Heizöllieferanten erfordert.

6.6 Sensitivitätsanalyse

Eine hohe Unsicherheit besteht in der zukünftigen Entwicklung der Energiepreise auf Endverbraucherebene. Um diese Einflüsse auf die Ergebnisse der Sanierungsaktivität und den Zubau von EE-Wärme-Technologien zu untersuchen, werden Sensitivitätsrechnungen durchgeführt. Dazu wird das *Frozen-Policy*-Szenario mit unterschiedlichen Energiepreisentwicklungen für die Jahre 2012 bis 2020 simuliert. Dabei wird sowohl der Einfluss auf den Rückgang des Endenergiebedarfs als auch auf den Energieträgermix untersucht. Variiert wird daher einerseits die Höhe der Energiepreissteigerung, anderseits auch das Verhältnis der Energiepreise fossiler zu biogenen Brennstoffen sowie zum Strom- bzw. Wärmepumpentarif.

Tabelle 22 stellt zunächst den Einfluss der Energiepreisentwicklung mit gleichen jährlichen Steigerungsraten aller Energieträger dar. Es zeigt sich, dass eine allgemeine Steigerung der Energiepreise im Bereich von 3 bis 7 Prozent pro Jahr nur einen geringeren Einfluss auf die Entwicklung des Wärmeendenergiebedarfs hat im Vergleich zu konstant angenommenen Energiepreisen.

Tabelle 22: Einfluss der Energiepreissteigerung aller Energieträger für die Jahre 2012 bis 2020

Energiepreise	Rückgang Energiebedarf		EE-Wärmebereitstellung	
Änderung/a [%]	Absolut [TWh]	Relative zu Frozen Policy [%]	Absolut [TWh]	Relative zu Frozen Policy [%]
0 %	64 597	1,3 %	105 336	-2,7 %
3 %	65 073	0,6 %	105 686	-2,4 %
5 %	65 683	-0,4 %	106 274	-1,9 %
7 %	65 969	-0,8 %	107 625	-0,6 %
10 %	68 032	-4,0 %	107 908	-0,3 %

Bei einer Steigerung von 10 Prozent pro Jahr zeigen sich deutlichere Effekte auf die energetische Sanierungsaktivität und den damit verbundenen Rückgang des Endenergiebedarfs. Der Zubau von EE-Wärme nimmt ebenfalls mit steigenden Energiepreisen zu. Bei konstanten fortgeschriebenen Energiepreisen liegt die erneubare Wärmebereitstellung um 2,7 Prozent niedriger als im *Frozen-Policy*-Szenario. Mit steigenden Energiepreisen nimmt der Unterschied ab.

Werden hingegen nur Energiepreise der fossilen Brennstoffe bei konstanten Preisen biogener Brennstoffe sowie einem konstanten Strompreis variiert, sind die Einflüsse auf den Energieträgermix deutlicher (Tabelle 23). Deutliche Änderungen zeigen sich beim Zubau von Biomasseanlagen und insbesondere Wärmepumpen. Der Einfluss auf die Solarthermie ist hingegen kaum vorhanden, da der Anreiz durch mehr Biomasseanlagen und Wärmepumpen kompensiert wird.

Tabelle 23: Einfluss der Energiepreissteigerung fossiler Energieträger für die Jahre 2012 bis 2020

Energiepreise	EE - Wärmebereitstellung		Änderung Wärmebereitstellung gegenüber Frozen Policy		
Änderung/a [%]	Absolut [TWh]	Anteil [%]	Biomasse [%]	Erd-/Umwelt-wärme [%]	Solarthermie [%]
3 %	109 982	15,1 %	2,1 %	-0,3 %	0,1 %
5 %	116 124	16,0 %	6,8 %	13,4 %	0,9 %
7 %	123 019	16,9 %	12,2 %	21,9 %	0,7 %
10 %	132 218	18,2 %	19,4 %	26,3 %	-0,3 %

Die letzte Sensitivitätsrechnung zeigt die Veränderung im Falle konstanter fossiler Brennstoff- und Strompreise bei steigenden biogenen Brennstoffpreisen. Erwartungsgemäß zeigt sich ein deutlicher Einfluss auf die Entwicklung der Wärmebereitstellung durch Biomasse. Unter konstanten fossilen Brennstoff- und Strompreisen bzw. Wärmepumpentarifen zeigt sich jedoch auch ein signifikanter Rückgang bei der Erd- und Umweltwärme, der sich jedoch mit steigenden Biomassepreisen abschwächt. Der Rückgang ist darauf zurückzuführen, dass im *Frozen-Policy*-Szenario die Energiepreissteigerung der fossilen Energieträger über denen der Wärmepumpentarife liegt, so dass sich in dieser Sensitivität das Energieverhältnis zugunsten der fossilen Brennstoffe verschiebt. Die Abschwächung dieses Effektes mit steigenden Biomassepreisen ist darauf zurückzuführen, dass Investoren, die neben ökonomischen auch Nachhaltigkeitsaspekte berücksichtigen, mit zunehmender Verschlechterung der Wirtschaftlichkeit von Biomasseanalgen Wärmepumpen wählen. Der gleiche Zusammenhang zeigt sich bei der Solarthermie, wobei der Einfluss der Energiepreisänderung auf die Solarthermie auch in dieser Sensitivitätsrechnung vergleichsweise gering ist.

Tabelle 24: Einfluss der Energiepreissteigerung biogener Energieträger für die Jahre 2012 bis 2020

Energiepreise	EE-Wärmebereitstellung		Änderung Wärmebereitstellung gegenüber Frozen Policy		
Änderung/a [%]	Absolut [TWh]	Anteil [%]	Biomasse [%]	Erd-/Umwelt-wärme [%]	Solarthermie [%]
3 %	101 804	14,0 %	-6,6 %	-11,0 %	-1,6 %
5 %	100 016	13,8 %	-9,3 %	-9,5 %	-1,4 %
7 %	98 435	13,6 %	-11,9 %	-8,8 %	-0,8 %
10 %	97 377	13,4 %	-13,9 %	-7,0 %	-0,4 %

7 Schlussfolgerung und Ausblick

Die Transformation zu einem ressourcenschonenden, kohlenstoffarmen Energiesystem stellt eine zentrale energiepolitische Zielsetzung in Deutschland und der EU dar. Eine entscheidende Rolle spielt in diesem Zusammenhang die Wärmbereitstellung in Gebäuden, auf die in Deutschland rund ein Drittel des gesamten Endenergiebedarfs entfällt (AGEB et al. 2012). Im Rahmen des *Energiekonzepts* und der *Energiewende* sind verbindliche Ziele für diesen Sektor verabschiedet worden, die u. a. einen Anteil von 14 Prozent erneuerbarer Energien (EE) an der Wärmebereitstellung bis 2020 vorsehen sowie eine Reduktion des Wärmeendenergiebedarfs in Gebäuden um 20 Prozent gegenüber 2008. Vor diesem Hintergrund stellt sich die Frage, welche energiepolitischen Instrumente eine effektive Wirkung hinsichtlich des Abbaus bestehender Hemmnisse und der Verstärkung fördernder Faktoren induzieren können.

Dazu wird in dieser Arbeit eine modellbasierte Untersuchung des Gebäudebereichs und möglicher Politikinstrumente zur Förderung erneuerbarer Energien und Energieeffizienzmaßnahmen durchgeführt. Im Folgenden werden zunächst die zentralen Schlussfolgerungen aus der Entwicklung des agentenbasierten Modells gezogen, bevor die zentralen Ergebnisse der Szenarienanalyse diskutiert werden. Das Kapitel schließt mit der kritischen Würdigung und dem Ausblick auf Anknüpfungspunkte für zukünftige Forschung.

7.1 Schlussfolgerung zur Modellentwicklung

Im Rahmen dieser Arbeit wird ein quantitatives Modell entwickelt, welches zur Bewertung von Politikinstrumenten unter Berücksichtigung individueller Entscheidungsprozesse eingesetzt wird. Es wird ein agentenbasierter Ansatz gewählt, der in ein bestehendes bauphysikalisches Simulationsmodell des Gebäudebereichs integriert wurde. Das resultierende Modell ermöglicht erstmals eine detaillierte und integrierte Abbildung auf den folgenden, für die Diffusion von Energieeffizienzmaßnahmen und EE-Wärme-Technologien relevanten Ebenen:

- Abbildung und Simulation der Investoren im Gebäudebereich: Es werden heterogene Investoren abgebildet, die unter unterschiedlichen administrativen, ökonomischen und informatorischen Voraussetzungen agieren.
- Abbildung und Simulation des Energiesystems Gebäude und der relevante Technologien: Der Gebäudebereich wird disaggregiert über eine detaillierte thermische Simulation von Referenzgebäuden unter Berücksichtigung der jeweiligen bauphysikalischen und technologischen Parameter abgebildet.

- Abbildung der energiepolitischen Maßnahmen und deren Auswirkung auf die individuelle Investitionsentscheidung: Es werden Politikinstrumente in unterschiedlichen Ausgestaltungsvarianten modelliert, welche die Bedingungen der Investitionsentscheidung in Abhängigkeit der agentenspezifischen Wahrnehmung individuell beeinflussen.

Das Modell verbindet diese drei Ebenen, um den gesamten Gebäudebereich auf nationaler Ebene abzubilden und die Investitionsentscheidungen in Wärmeversorgungssysteme und Energieeffizienzmaßnahmen in Jahresschritten zu simulieren. Dies ermöglicht es, die Entwicklung des Wärmeenergiebedarfs und die Art der Wärmebereitstellung unter verschiedenen energiepolitischen Maßnahmenbündeln in explorativen Szenarien zu untersuchen.

Investorenagenten werden hinsichtlich ihrer Entscheidungskriterien, Risikoaversion, Energiepreiswahrnehmungen und Informationsverfügbarkeit unterschieden, womit einerseits individuelle Entscheidungsstrategien, anderseits auch spezifische Hemmnisse abgebildet werden können. Darauf basierend wird in jedem Zeitschritt die Investitionsentscheidung für jede Investoren-Gebäudekombination simuliert und die entsprechenden Marktanteile der Technologien ermittelt. Durch Kombination eines agentenbasierten Ansatzes mit einer *Nested-Logit*-Simulation erlaubt das Modell eine realistische Abbildung der vorhandenen Marktdynamiken.

Das Modell ermöglicht die Analyse unterschiedlicher Politikinstrumente in hohem Detaillierungsgrad, womit der Einfluss relevanter Parameter im Politikdesign untersucht werden kann. Die Förder- oder Anforderungsbedingungen der Instrumente können differenziert nach adressierten Technologien, Investoren und Gebäudetypen definiert werden. Neben bestehenden Politikinstrumenten im Gebäudebereich, wie ordnungsrechtlichen Anforderungen und öffentlich finanzierten Förderprogrammen, werden auch haushaltsunabhängige Instrumente abgebildet, die als neue Optionen zur Finanzierung von EE-Wärme politisch diskutiert werden (Bundesregierung 2011; Seefeldt et al. 2011). Bei der Untersuchung eines quotenbasierten Instruments werden zusätzlich zu den Investoren im Gebäudebereich die verpflichteten Akteure auf Ebene des Brennstoffhandels als Agent im Modell abgebildet, der Förderhöhen dynamisch anpasst und die entstandenen Kosten auf die Brennstoffpreise umlegt.

Zur Anwendung des Modells auf den Gebäudebereich in Deutschland werden Referenzgebäudetypologie, relevante Technologien und Investorenagenten basierend auf vorhandenen Erhebungen und empirischen Studien zum Investitionsverhalten definiert. Die Validierung des Modells resultiert in einer sehr guten Übereinstimmung zwischen den simulierten Ergebnissen und realen Daten zur Marktentwicklung dezentraler Wär-

meversorgungssysteme und der Entwicklung des Endenergiebedarfs für die Jahre 2009 bis 2011.

7.2 Schlussfolgerung aus der Analyse der Politikinstrumente zur Förderung von EE-Wärme und Energieeffizienzmaßnahmen

Um die Wirkung von Politikinstrumenten zu analysieren, werden Maßnahmenbündel definiert, die sich an energiepolitischen Leitlinien orientieren und sich entweder auf eine Verschärfung des Ordnungsrechts, die Erhöhung der öffentlichen Finanzierung oder die Umstellung auf haushaltsunabhängige Förderinstrumente fokussieren. In jedem Maßnahmenbündel werden die jeweiligen Kerninstrumente in unterschiedlicher Ausgestaltung gerechnet. Zusätzliche Varianten untersuchen die Ergänzung der Kerninstrumente durch flankierende akteursspezifische Maßnahmen. Insgesamt werden zwölf Politikszenarien modelliert, die hinsichtlich ihrer induzierten Wirkung mit einem Referenzszenario (*Frozen Policy*) verglichen werden, welches einer Fortschreibung der derzeitigen energiepolitischen Rahmenbedingungen entspricht.

Mit Bezug auf die Zielsetzung der *Energiewende* und des *Energiekonzepts* zeigen die Ergebnisse, dass das „20-Prozent-Energieeffizienzziel“ bis zum Jahr 2020 sehr ambitioniert ist und in allen untersuchten Politikszenarien deutlich unterschritten wird. Vor dem Hintergrund der langen Investitionszyklen im Gebäudebereich verdeutlichen die Resultate, dass ambitionierte energiepolitische Rahmenbedingungen zur Erhöhung der Energieeffizienz geschaffen werden müssen, wenn die politischen Ziele auch in der langfristigen Perspektive bis 2050 erreicht werden sollen. Der höchste Rückgang des Wärmeendenergiebedarfs wird in den Szenarien mit einer Verschärfung des Ordnungsrechts für neue und bestehende Gebäude erreicht. Eine deutliche Ausweitung der finanziellen Fördermittel, mit Verdoppelung der derzeitigen Fördersätze für Energieeffizienzmaßnahmen, kann hingegen nicht den gleichen Effekt erreichen. Die Ergebnisse machen somit deutlich, dass ein Fokus auf finanzielle Förderung als zentrale energiepolitische Leitlinie keine ausreichende Alternative zur Verschärfung des Ordnungsrechts darstellt. Da Energieeffizienzmaßnahmen an der Gebäudehülle jedoch mit sehr hohen Investitionen verbunden sind, die sich erst über einen langen Zeitraum von mehreren Jahrzenten amortisieren, wäre jedoch nicht zuletzt aus Akzeptanzgründen bei Investoren und politischen Akteuren eine Kombination von ambitioniertem Ordnungsrecht bei gleichzeitiger finanzieller Förderung der geforderten Maßnahmen sinnvoll.

Der stärkste Ausbau erneuerbarer Wärme resultiert ebenfalls im Maßnahmenbündel mit Fokus Ordnungsrecht. Dies wird durch die Ausweitung der Nutzungspflicht des

EEWärmeG auf den Gebäudebestand erreicht. Das Politikdesign ist in diesem Fall besonders essentiell. Die Einführung einer Nutzungspflicht für Gebäude, die eine grundlegende Sanierung erfahren – wie es in der *EE-Richtlinie* gefordert wird – induziert nur geringe zusätzliche Wirkung im Vergleich zum *Frozen-Policy*-Szenario. Wird die Nutzungspflicht hingegen an den Austausch des Wärmeversorgungssystems gekoppelt, werden bis zum Jahr 2020, auch unter der Annahme eines verzögerten Austausches durch die Investoren, deutlich mehr EE-Systeme installiert. Damit wird in diesem Szenario das EE-Wärme-Ziel erreicht, was in den anderen Politikszenarien nicht der Fall ist.

Die Ergebnisse der Szenarien mit haushaltsunabhängigen Förderinstrumenten zeigen für die untersuchten Politikvarianten einen ähnlich hohen EE-Wärme-Ausbau. Eine Quotenverpflichtung auf Ebene der Brennstofflieferanten (*Portfoliomodell)* ist jedoch mit geringeren Investitionszuschüssen verbunden als eine Zahlungsverpflichtung mit festen Vergütungssätzen (*Prämienmodell).* Die marktgetriebene Anpassung der Vergütungen bzw. Zertifikatspreise führt dabei zu einer signifikanten Reduktion der Mitnahmeeffekte, die ansonsten bei allen untersuchten finanziellen Förderinstrumenten eine hohe Relevanz aufweisen. Die gesamten Politikkosten sind jedoch in den Szenariovarianten mit *Portfoliomodell* aufgrund der anfallenden Strafzahlungen höher. Als ein Hauptargument gegen mengengesteuerte Instrumente im Strombereich wird oftmals die fehlende Investitionssicherheit aufgrund der Preisschwankungen angeführt. Dies ist jedoch für die in dieser Arbeit untersuchten Instrumente im Wärmebereich nicht relevant. Das *Portfoliomodell* sieht wie das *Prämienmodell* eine Vergütung der Investoren durch Einmalzahlung zum Zeitpunkt der Installation der Anlage vor. Zum Zeitpunkt der Installation kennt ein Investor also die möglichen Zuschüsse im *Portfoliomodell* und trifft seine Investitionsentscheidung ohne Risiko über die resultierenden Zuschüsse. Die einzige Unsicherheit besteht – abgesehen von der Energiepreisentwicklung – darin, ob sich die Förderbedingungen im nächsten Jahr verbessern oder verschlechtern und ob mit der Installation – sofern möglich – gewartet werden sollte. Diese Unsicherheit besteht jedoch auch im *Prämienmodell* sowie in der bestehenden Förderung durch das *Marktanreizprogramm*, da die Fördersätze politisch festgelegt werden und entsprechend Änderungen ausgesetzt sind.

Die untersuchten flankierenden Instrumente zur Adressierung akteursspezifischer Hemmnisse verdeutlichen im Falle einer ordnungsrechtlichen Verschärfung für Energieeffizienzanforderungen die Relevanz von Vollzugsmaßnahmen, die mit einer höheren Compliance der Investorenagenten verbunden ist. Informatorische Maßnahmen zur Verbesserung der Wahrnehmungen von Förderinstrumenten zeigen insbesondere in Kombination mit dem *Portfoliomodell* Wirkung. Es wird dabei eine größere Menge potentieller Investoren adressiert, die ohne informatorische Maßnahmen die Vergütungen

nicht in ihrer Investitionsentscheidung berücksichtigen. Jede Erhöhung des Zertifikatspreises verbessert somit die Investitionsbedingungen für EE-Wärme von einer größeren Anzahl an Akteuren. Ohne informatorische Maßnahmen resultieren hingegen höhere Mitnahmeeffekte, da der Zertifikatspreis solange erhöht wird, bis die Quote erreicht ist oder Strafzahlungsoption günstiger wird, auch wenn durch die Erhöhung keine neuen Investoren erschlossen werden

7.3 Kritische Würdigung und Ausblick

Das entwickelte Modell zur Simulation individueller Investitionsprozesse und Untersuchung unterschiedlicher Politikinstrumente im Wärmebereich bietet an verschiedenen Stellen Ansatzpunkte zur Weiterentwicklung.

Für die Diffusion von Wärmeversorgungssystemen stellen neben den Investoren die Installateure eine relevante Akteursgruppe dar, da sie als zentrale Intermediäre für Information, Installation und Verkauf der Technologien verantwortlich sind. Ein nächster Entwicklungsschritt, der bereits angegangen wird, besteht in der Integration dieser Akteure als Agenten in das Modell. Dadurch ließen sich Einflüsse dieser Akteure im Investitionsprozess abbilden sowie bestehende Marktdynamiken in der Interaktion zwischen Investoren und Intermediären modellieren, die sich beispielweise durch Lerneffekte und durch die Nachfrage bedingte Anpassung des Produktportfolios zeigen.

Ein weiterer Aspekt besteht in der detaillierten Modellierung wärmenetzgebundener Versorgungssysteme. Diese sind bisher im Rahmen dieser Arbeit als Technologieoptionen aus Sicht der Investoren implementiert, die in bestimmten Regionen zur Verfügung stehen. Die zukünftige Entwicklung der Fern- und Nahwärme wird in der vorliegenden Arbeit exogen durch Kopplung mit einem siedlungstypologischen Modell bestimmt. Folglich besteht eine mögliche methodische Weiterentwicklung in der Endogenisierung der Wärmenetzmodellierung unter Berücksichtigung raumbezogener Daten wie Siedlungsstruktur und Transportwege biogener Energieträger.

Vor dem Hintergrund einer steigenden volatilen Stromerzeugung und der daraus entstehenden Anforderung an die Lastverlagerung ist zunehmend eine integrierte Betrachtung von Strom- und Wärmebereich in der Energiesystemanalyse erforderlich. Ein Anknüpfungspunkt für weitere Forschung besteht daher in einer detaillierten Abbildung der für eine Strommarktmodellierung relevanten Parameter, die insbesondere in einer stündlichen Auflösung der strombasierten Wärmenachfrage und der wärmegeführten KWK-Systeme liegt. Aus Perspektive der Simulation von Investitionsentscheidungen im Wärmebereich könnte damit der Einfluss lastvariabler Tarife auf die Wirtschaftlichkeit der Wärmeversorgungssysteme detailliert abgebildet werden.

Eine empirische Untersuchung zum Verhalten der Investoren wurde im Rahmen dieser Arbeit nicht durchgeführt. Insbesondere im Bereich der institutionellen Gebäudeeigentümer besteht jedoch noch eine Forschungslücke. Eine Forschungsfrage wäre beispielsweise, inwieweit Unterschiede in den Hemmnissen zwischen genossenschaftlichen, kommunalen und privatwirtschaftlichen Wohnungsbauakteuren bestehen. Des Weiteren ist die Struktur der Investoren und auch der Gebäude im Nichtwohngebäudebereich bisher wenig empirisch untersucht.

Weitere Forschungsansätze bieten sich jedoch auch in der Anwendung des Modells. Zusätzliche Untersuchungen zur Ausgestaltung der neuen haushaltsunabhängigen Politikinstrumente für EE-Wärme sollten beispielsweise unter dem Gesichtspunkt einer optimalen Ausgestaltung von Quotenhöhe und Strafzahlungen durchgeführt werden. Auch die Anwendung des Modells auf verschiedene Länder und Regionen bietet die Möglichkeit, geeignete Ausgestaltungen von Politikinstrumenten vor dem Hintergrund unterschiedlicher Investoren- und Hemmnisstrukturen zu ermitteln.

Zusammenfassend ermöglicht das flexible Design des entwickelten Modells sowohl die einfache Integration neuer empirische Erkenntnisse als auch die Implementierung modelltechnischer Erweiterungen mit Bezug auf den dargestellten Forschungsbedarf.

8 Zusammenfassung

Die Transformation zu einer nachhaltigen Energieversorgung stellt ein zentrales politisches Ziel in Deutschland und auf europäischer Ebene dar. Eine hohe Relevanz hat in diesem Zusammenhang die Wärmebereitstellung in Gebäuden, auf die rund 30 Prozent des gesamten Endenergiebedarfs in Deutschland entfällt. Die Energieeffizienzpotentiale des Gebäudebereichs konnten allerdings bisher nicht im erhofften Umfang erschlossen werden. Ebenso ist der Ausbau erneuerbarer Energien im Wärmebereich nicht im gleichen Maße vorangekommen, wie es im Strombereich der Fall ist. Gleichzeitig sind mit den Beschlüssen des *Energiekonzepts* und der *Energiewende* erstmals Ziele für diesen Sektor definiert worden. So sollen bis zum Jahr 2020 der Anteil erneuerbarer Energien an der Wärmeversorgung auf 14 Prozent gesteigert und der Wärmeendenergiebedarf in Gebäuden um 20 Prozent gegenüber dem Jahr 2008 gesenkt werden. Vor diesem Hintergrund stellt sich die Frage, welche energiepolitischen Instrumente eine effektive Wirkung zum Abbau bestehender Hemmnisse leisten können.

Das Ziel dieser Arbeit besteht darin, Politikinstrumente zur Förderung von erneuerbaren Energien im Wärmebereich und der Diffusion von Energieeffizienzmaßnahmen quantitativ zu bewerten. Dabei werden das individuelle Entscheidungsverhalten der Investoren sowie bestehende Hemmnisse im Gebäudebereich explizit berücksichtigt. Der Untersuchungsrahmen der Arbeit umfasst die Anwendungsbereiche Raumwärme und Warmwasser in Gebäuden im Sektor Private Haushalte (Wohngebäude) sowie im Sektor Gewerbe, Handel und Dienstleistungen (Nichtwohngebäude).

Der erste Schritt der Analyse besteht in einer Charaktersierung des Gebäudebereichs hinsichtlich des Energieträgereinsatzes, der eingesetzten Technologien, möglicher Energieeffizienzmaßnahmen an der Gebäudehülle und der relevanten Akteure. Die Untersuchung schließt die am Markt zur Verfügung stehenden Wärmeversorgungstechnologien ein, welche anhand ihrer derzeitigen Marktsituation, der spezifischen Investitionen und resultierender Wärmebereitstellungskosten in verschiedenen Gebäudetypen charakterisiert werden. Die Einordnung von Energieeffizienzmaßnahmen an der Gebäudehülle erfolgt anhand der Wärmedurchgangskoeffizienten und spezifischen Investitionen bei der energetischen Sanierung unterschiedlicher Bauteile. Die für den Investitionsprozess relevanten Akteure werden entlang der Wertschöpfungskette, der mit der Wärmenachfrage und -erzeugung verbundenen Produkte und Dienstleistungen, identifiziert. Aufgrund der überwiegend dezentralen Erzeugungsstruktur stellen Gebäudeeigentümer als Entscheider über Wärmeversorgungstechnologien und Investitionen in Effizienzmaßnahmen die zentralen Akteure dar. Die Wärmenachfrage wird wiederum durch die Nutzer der Gebäude bestimmt, welche aufgrund der relativ hohen Mietquote im Wohngebäudebereich in vielen Fällen eine andere Akteursgruppe darstellen. Eine

erste Strukturierung der Investoren im Gebäudebereich ergibt sich dementsprechend nach dem Eigentums-Nutzungsverhältnis in Eigentümer-Eigennutzer, Private Vermieter, Eigentümergemeinschaften und Wohnungsgesellschaften. Auf Grundlage bestehender empirischer Untersuchungen werden für diese Akteure investorenspezifische Hemmnisse, fördernde Faktoren und Entscheidungskalküle herausgearbeitet. Aufgrund der Heterogenität der privaten Investoren in Bezug auf ihre Handlungsmotive und unterschiedliche Relevanz monetärer und nicht-monetärer Hemmnisse ergibt sich insbesondere für die Gruppe der Eigentümer-Eigennutzer eine weitere Differenzierung.

Bestehende Hemmnisse zur Diffusion von Energieeffizienzmaßnahmen und erneuerbaren Energien können durch die Implementierungen geeigneter Politikinstrumente verringert oder beseitigt werden. In Deutschland ist der derzeitige Rechts- und Förderrahmen sowohl durch ordnungsrechtliche Vorgaben als auch durch finanzielle Förderung und informatorische Instrumente gekennzeichnet. Darüber hinaus bestehen neue Instrumentenansätze und Optionen zur Weiterentwicklung bestehender Politikinstrumente. Grundlage für die quantitative Untersuchung der Instrumentenoptionen ist dabei die Beschreibung der möglichen Politikvarianten und deren wichtigsten Ausgestaltungsparameter.

Zur Untersuchung der Wirkung der Politikinstrumente wird ein modellbasierter Ansatz gewählt, der es ermöglicht, die verschiedenen Instrumentenoptionen in unterschiedlicher Ausgestaltung explizit abzubilden. Als weitere Anforderungen an den Modellansatz ergeben sich aus der Analyse des Gebäudebereichs die adäquate Berücksichtigung individueller Investitionsprozesse, bestehender Hemmnisse sowie fördernder Faktoren. Zudem sollte der Gebäudebestand in einem hohen Detaillierungsgrad bezüglich der relevanten technischen und ökonomischen Parameter abgebildet werden. Zur Auswahl des Modellansatzes werden zunächst bestehende Energiesystemmodellansätze und Methoden zur Modellierung von Investitionsverhalten dargestellt, analysiert und bewertet. Die Energiesystemmodellierung im Gebäudebereich kann hinsichtlich ihres Aggregationslevels – *bottom-up* oder *top-down* –, der verwendeten Methode zur Ermittlung des Energiebedarfs, basierend auf statistischen oder bauphysikalischen Eingangsdaten, sowie hinsichtlich des zentralen Modellierungsansatzes unterschieden werden. Zur Bewertung technologischer und politischer Maßnahmen haben sich *Bottom-up*-Modellentwürfe, die das jeweilige Energiesystem mittels disaggregierter Daten beschreiben, als geeignetes Werkzeug etabliert. Bezüglich des zentralen Modellierungsansatzes können die Modelle in Optimierung, Simulation oder Bilanzierung unterschieden werden. Simulationsmodelle bilden Energienachfrage und -bereitstellung auf eine deskriptive Weise unter Berücksichtigung mikroökonomischer Entscheidungsfindung ab, während Optimierungsmodelle einen präskriptiven Ansatz verfolgen, um kostenoptimale Systemzustände unter Berücksichtigung unterschiedlicher

Marktbedingungen und bestimmter Politikziele abzuleiten. Bei Bilanzierungsmodellen erfolgt hingegen eine exogene Vorgabe der Technologiewahl bzw. der Marktanteile durch den Modellanwender. Für die in dieser Arbeit untersuchte Forschungsfrage stellt ein *Bottom-up*-Simulationsmodell mit einer bauphysikalischen Energiebedarfsberechnung einen geeigneten Ansatz dar. Bestehende Simulationsmodelle für den Gebäudebereich weisen eine hohe Genauigkeit und Auflösung hinsichtlich der technischen und ökonomischen Parameter auf, während der Entscheidungsprozess als Treiber der technologischen Adaption aggregiert abgebildet wird. Eine geeignete Methode zur Integration individuellen Entscheidungsverhaltens in einer Simulationsumgebung stellt die agentenbasierte Modellierung dar. Der Fokus bestehender agentenbasierter Modelle für den Gebäudebereich liegt jedoch auf der Simulation der Technologiewahl, ohne eine detaillierte Abbildung des gesamten Gebäudebereichs vorzunehmen. Für die vorliegende Arbeit wird daher ein kombinierter Modelansatz gewählt, der ein technoökonomisches Energiesystemmodell mit einer agentenbasierten Simulation verbindet.

Das resultierende Modell ermöglicht erstmals eine detaillierte und integrierte Abbildung auf den Ebenen der Investoren, des Energiesystems Gebäude sowie der energiepolitischen Maßnahmen und deren Auswirkung auf die individuelle Investitionsentscheidung. Investorenagenten werden hinsichtlich ihrer Entscheidungskriterien, Risikoaversion, Energiepreiswahrnehmungen und Informationsverfügbarkeit unterschieden, womit einerseits individuelle Entscheidungsstrategien, andererseits auch spezifische Hemmnisse abgebildet werden können. Darauf basierend wird in jedem Zeitschritt die Investitionsentscheidung für jede Investoren-Gebäudekombination simuliert und die entsprechenden Marktanteile der Technologien ermittelt. Durch Kombination eines agentenbasierten Ansatzes mit einer *Nested-Logit*-Simulation erlaubt das Modell eine realistische Abbildung der vorhandenen Marktdynamiken. Das Modell ermöglicht die Analyse unterschiedlicher Politikinstrumente in hohem Detaillierungsgrad, womit der Einfluss relevanter Parameter im Politikdesign untersucht werden kann. Die Förderbedingungen und ordnungsrechtlichen Anforderungen der Instrumente können differenziert nach adressierten Technologien, Investoren und Gebäudetypen definiert werden. Neben bestehenden Politikinstrumenten im Gebäudebereich, wie ordnungsrechtlichen Vorgaben und öffentlich finanzierten Förderprogrammen, werden auch haushaltsunabhängige Finanzierungsinstrumente für erneuerbare Wärmetechnologien abgebildet. Bei der Untersuchung eines quotenbasierten Instruments werden zusätzlich zu den Investoren im Gebäudebereich die verpflichteten Akteure auf Ebene des Brennstoffhandels als Agent im Modell abgebildet, der Förderhöhen dynamisch anpasst und die entstanden Kosten auf die Brennstoffpreise umgelegt.

Für das im Rahmen dieser Arbeit entwickelte Modell wurde der Gebäudebereich in Deutschland abgebildet und dafür Referenzgebäudetypologie, relevante Technologien

und Investorenagenten basierend auf vorhandenen Erhebungen und empirischen Studien zum Investitionsverhalten definiert. Die Validierung des Modells gegenüber Realdaten aus der Vergangenheit resultiert in einer sehr guten Übereinstimmung zwischen den simulierten Ergebnissen und realen Daten zur Marktentwicklung dezentraler Wärmeversorgungssysteme und der Entwicklung des Endenergiebedarfs für die Jahre 2009 bis 2011.

In insgesamt zwölf Szenarien werden drei Maßnahmenbündel in unterschiedlichen Ausgestaltungen für den Zeitraum 2008 bis zum Jahre 2020 analysiert und mit einem Referenzszenario des derzeitigen Rechts- und Förderrahmens verglichen. Das erste Maßnahmenbündel ist auf die Verschärfung des Ordnungsrechts fokussiert, während im zweiten der Fokus auf einer Ausweitung der bestehenden finanziellen Förderinstrumente liegt. Das dritte Maßnahmenbündel untersucht die Wirkung neuer haushaltsunabhängiger Politikinstrumente, die entweder als Quoten- oder als Zahlungsverpflichtung mit festen Vergütungssätzen auf Ebene des Brennstoffhandels modelliert werden.

Die Ergebnisse verdeutlichen, dass die im Zuge der Energiewende definierten Ziele für den Gebäudebereich und den Ausbau erneuerbarer Wärme sehr ambitioniert sind. Das Effizienzziel wird in allen Szenarien deutlich unterschritten. Die höchsten Energieeinsparungen werden in den Szenarien mit einer Fokussierung auf ambitionierte ordnungsrechtliche Vorgaben für Bestandsgebäude erreicht. Der relative Rückgang des Wärmeendenergiebedarfs liegt mit 15,3 Prozent (108,5 TWh) deutlich unter dem Zielwert von 20 Prozent. Eine Fokussierung auf finanzielle Förderung erzielt hingegen auch bei einer Verdoppelung der spezifischen Fördersätze nicht denselben Effekt. Während in den ordnungsrechtlichen Politikszenarien eine zusätzliche jährliche Einsparung zwischen 8,2 und 12,9 TWh im Jahr 2020 erreicht wird, liegt diese in den Szenarien mit Fokus auf finanzielle Förderung zwischen 2,6 und 7 TWh. Die durchschnittlich ausgezahlten Fördermittel für Effizienzmaßnahmen liegen im zweiten und dritten Maßnahmenbündel zwischen 2 und 4,1 Milliarden Euro pro Jahr im Vergleich zu rund 1,7 Milliarden Euro im Referenzszenario. Der Vergleich der zusätzlich induzierten Investitionen mit den zusätzlich eingesetzten Fördermitteln verdeutlicht die hohen Mitnahmeeffekte bei der Ausweitung der derzeitigen Finanzierungsinstrumente. Einerseits fließen die zusätzlichen Mittel zum großen Teil an Investoren, welche ohnehin eine energetische Sanierung durchgeführt hätten, andererseits reicht die Höhe der Zuschüsse nicht aus, um neue Investorengruppen in größerem Umfang zu erschließen.

Der mit Abstand höchste Zubau erneuerbarer Energien resultiert bei einer Ausweitung der Nutzungspflicht des *Erneuerbaren-Energien-Wärmegesetztes* auf den Gebäudebestand, sofern diese an den Tausch des Wärmeversorgungssystems gekoppelt ist. Gegenüber dem Referenzszenario ergibt sich im Jahr 2020 ein zusätzlicher Beitrag er-

neuerbarer Energien von 20 TWh, womit das Erneuerbare-Energien-Ziel für den Wärmebereich erreicht wird. Eine Ausweitung der Nutzungspflicht mit Kopplung an eine grundlegende Sanierung der Gebäude, so wie es durch die *Erneuerbare-Energien-Richtlinie* postuliert wird, führt allerdings aufgrund der wenigen Fallzahlen nur zu einem geringfügig höheren Ausbau als im Referenzszenario.

Die Ergebnisse der Szenarien mit haushaltsunabhängigen Förderinstrumenten führen in den untersuchten Politikvarianten ohne zusätzliche informatorische Maßnahmen zu einer jährlichen Wärmebereitstellung durch erneuerbare Energien in gleicher Größenordnung (6,1 TWh zusätzlich im Jahr 2020 gegenüber dem Referenzszenario). Eine Quotenverpflichtung auf Ebene der Brennstofflieferanten (*Portfoliomodell)* ist jedoch mit geringeren Investitionszuschüssen verbunden als eine Zahlungsverpflichtung mit festen Vergütungssätzen (*Prämienmodell).* Die marktgetriebene Anpassung der Vergütungen bzw. Zertifikatspreise führt dabei zu einer signifikanten Reduktion der Mitnahmeeffekte, die ansonsten bei allen untersuchten finanziellen Förderinstrumenten eine hohe Relevanz aufweisen. Die gesamten Politikkosten sind jedoch in den Szenariovarianten mit *Portfoliomodell* aufgrund der anfallenden Strafzahlungen bei Unterschreitung der Quote höher.

Die untersuchten flankierenden Instrumente zur Adressierung akteursspezifischer Hemmnisse verdeutlichen im Falle einer ordnungsrechtlichen Verschärfung für Energieeffizienzanforderungen die Relevanz von Vollzugsmaßnahmen, die mit einer höheren Compliance der Investorenagenten verbunden sind. Informatorische Maßnahmen zur Verbesserung der Wahrnehmungen von Förderinstrumenten zeigen insbesondere in Kombination mit dem *Portfoliomodell* Wirkung. Es wird dadurch eine größere Menge potentieller Investoren adressiert, die ohne informatorische Maßnahmen die Vergütungen nicht in ihrer Investitionsentscheidung berücksichtigen. Ohne informatorische Maßnahmen resultieren hingegen höhere Mitnahmeeffekte, da der Zertifikatspreis solange erhöht wird, bis die Quote erreicht ist oder die Strafzahlungsoption für die verpflichteten Akteure günstiger wird, auch wenn durch die Erhöhung keine neuen Investoren erschlossen werden.

Anhang

A.1 Referenztechnologien und Referenzgebäude

Tabelle A.1: Jahresnutzungsgrade der Raumwärme und Warmwassererzeugung

Referenztechnologien	Jahresnutzungsgrad Heizung (35 °C Vorlauftemperatur)	Effizienzrückgang bei 55 °C Vorlauftemperatur	Jahresnutzungsgrad Warmwassererzeugung
Fernwärme	0.98	0.01	0.93
Blockheizung	0.98	0.01	0.93
Erdgas zentral	0.88	0.01	0.84
Erdgas Einzel	0.70	0	0.60
Erdgas Niedertemperatur	0.85	0.015	0.85
Erdgas Brennwert	0.93	0.015	0.88
Flüssiggas zentral	0.88	0.01	0.84
Heizöl zentral	0.85	0.01	0.77
Heizöl Einzel	0.70	0	0.60
Heizöl Niedertemperatur	0.85	0.015	0.77
Heizöl Brennwert	0.91	0.015	0.82
Kohle zentral	0.75	0.01	0.68
Kohle Einzel	0.65	0	0.55
Elektrische Direktheizung	0.96	0	0.91
Elektrische Einzelheizgeräte	0.92	0	0.78
Elektrische Nachtspeicherheizung	0.95	0	0.81
Wärmepumpe Sole/Wasser	4.20	0.28	3.15
Wärmepumpe Luft	3.10	0.38	2.33
Nahwärme biogen - fest	0.98	0.01	0.88
Nahwärme Biogas	0.98	0.01	0.93
Holzpellet zentral	0.83	0.01	0.75
Hackschnitzel zentral	0.79	0.01	0.71
Scheitholz zentral	0.75	0.01	0.68
Holz Einzel	0.65	0	0.55
BHKW alt	1.04	0.01	0.94
BHKW Heizöl	0.67	0.01	0.60
BHKW Pflanzenöl	0.67	0.01	0.60
BHKW Erdgas	0.67	0.01	0.60
BHKW Biogas	0.67	0.01	0.60
Biogas Brennwert	0.93	0.015	0.88
Bio-Heizöl Brennwert	0.88	0.015	0.79
Holzpellets Einzel	0.84	0	0.76

Tabelle A.2: Bauphysikalische Eingangsdaten der Referenzgebäudeklassen

Gebäudeklasse	Länge [m]	Breite [m]	Stock werke	Raum höhe	Anteil Fenster-fläche an Umfas-sungs-fläche	U-Wert Dach [W/m²K]	U-Wert Außen-wände [W/m²K]	U-Wert Fenster [W/m²K]	U-Wert unterer Gebäude-abschluss [W/m²K]
EFH_fooo_bis 1918	13.5	7.7	1.8	2.3	0.2	1.80	1.90	2.15	1.04
EFH_fooo_1919 - 1948	11.7	8.4	1.7	2.8	0.2	1.11	1.70	2.15	1.11
EFH_fooo_1949 - 1957	12.6	8.2	1.7	2.4	0.2	1.11	0.93	2.11	1.01
EFH_fooo_1958 - 1968	12.3	8.8	1.6	2.5	0.3	0.92	1.44	2.11	0.97
EFH_fooo_1969 - 1978	13.9	8.8	1.5	2.6	0.3	0.63	1.21	2.11	0.85
EFH_dooo_1979 - 1983	14.3	9.0	1.4	2.5	0.2	0.38	0.80	4.30	0.81
EFH_dooo_1984 - 1994	12.7	9.7	1.5	2.5	0.3	0.28	0.68	2.57	0.55
EFH_dooo_1995 - 2001	11.9	9.7	1.5	2.5	0.3	0.20	0.50	1.60	0.34
EFH_dooo_2002 - 2004	12.1	10.2	1.4	2.4	0.2	0.20	0.35	1.60	0.40
EFH_dooo_2005	12.4	11.2	1.3	2.4	0.2	0.20	0.35	1.60	0.40
EFH_dooo_2006	12.4	10.2	1.5	2.4	0.2	0.20	0.35	1.60	0.40
EFH_dooo_2007	13.2	9.3	1.4	2.4	0.2	0.20	0.35	1.60	0.40
EFH_dooo_2008	13.9	10.3	1.5	2.4	0.2	0.20	0.35	1.60	0.40
EFH_dooo_ab 2009	11.1	9.9	1.4	2.4	0.2	0.20	0.35	1.60	0.40
RH_fooo_bis 1918	11.0	6.5	2.1	2.9	0.1	0.78	1.70	2.15	0.91
RH_fooo_1919 - 1948	10.9	7.6	1.7	2.6	0.1	0.78	1.39	2.15	1.60
RH_fooo_1949 - 1957	10.0	8.1	1.9	2.6	0.2	0.78	0.86	2.11	1.01
RH_fooo_1958 - 1968	10.1	7.5	1.9	2.5	0.1	1.23	1.44	2.11	0.97
RH_fooo_1969 - 1978	10.4	8.0	1.8	2.5	0.2	0.52	0.80	2.11	0.97
RH_dooo_1979 - 1983	10.5	8.1	1.8	2.5	0.1	0.38	0.68	2.57	0.67
RH_dooo_1984 - 1994	9.5	8.6	1.9	2.5	0.2	0.28	0.77	2.57	0.55
RH_dooo_1995 - 2001	10.1	8.4	1.8	2.5	0.1	0.20	0.49	1.60	0.32
RH_dooo_2002 - 2004	10.0	8.4	1.8	2.5	0.3	0.13	0.24	1.60	0.29
RH_dooo_2005	9.0	9.0	1.8	2.5	0.3	0.13	0.24	1.60	0.29
RH_dooo_2006	9.2	8.6	2.2	2.5	0.3	0.13	0.24	1.60	0.29
RH_dooo_2007	9.7	9.3	1.9	2.5	0.3	0.13	0.24	1.60	0.29
RH_dooo_2008	9.0	9.0	2.1	2.5	0.3	0.13	0.24	1.60	0.29
KMFH_fooo_bis 1918	14.4	9.0	2.6	2.6	0.2	2.60	1.90	2.15	1.04
KMFH_fooo_1919 - 1948	13.3	10.0	2.4	2.8	0.2	1.41	1.64	2.15	1.11
KMFH_fooo_1949 - 1957	12.4	10.2	2.5	2.7	0.3	1.17	1.44	2.11	1.65
KMFH_fooo_1958 - 1968	14.3	9.7	2.7	2.6	0.5	2.30	1.21	2.11	0.97
KMFH_fooo_1969 - 1978	13.8	10.9	2.4	2.5	0.3	0.59	0.74	2.11	0.97
KMFH_dooo_1979 - 1983	16.0	10.3	2.5	2.8	0.3	0.39	0.80	2.57	0.67
KMFH_dooo_1984 - 1994	14.0	11.9	2.3	2.7	0.3	0.28	0.66	2.57	0.55

Gebäudeklasse	Länge [m]	Breite [m]	Stock werke	Raum höhe	Anteil Fenster-fläche an Umfas-sungs-fläche	U-Wert Dach [W/m²K]	U-Wert Außen-wände [W/m²K]	U-Wert Fenster [W/m²K]	U-Wert unterer Gebäude-abschluss [W/m²K]
KMFH_dooo_1995 - 2001	15.0	10.2	2.5	2.7	0.3	0.19	0.28	1.60	0.34
KMFH_dooo_2002 - 2004	12.5	12.5	2.6	2.5	0.3	0.20	0.35	1.60	0.34
KMFH_dooo_2005	11.9	11.9	2.5	2.5	0.3	0.20	0.35	1.60	0.34
KMFH_dooo_2006	12.5	12.5	2.5	2.5	0.3	0.20	0.35	1.60	0.34
KMFH_dooo_2007	11.7	11.7	2.3	2.5	0.3	0.20	0.35	1.60	0.34
KMFH_dooo_2008	17.6	17.6	1.7	2.5	0.3	0.20	0.35	1.60	0.34
MMFH_fooo_bis 1918	20.0	9.9	3.4	2.6	0.2	2.60	1.90	2.15	1.04
MMFH_fooo_1919 - 1948	15.6	10.9	4.0	2.8	0.2	1.41	1.64	2.15	1.11
MMFH_fooo_1949 - 1957	14.1	11.9	3.7	2.7	0.3	1.17	1.44	2.11	1.65
MMFH_fooo_1958 - 1968	16.6	10.4	3.8	2.6	0.5	2.30	1.21	2.11	0.97
MMFH_fooo_1969 - 1978	14.5	11.9	3.9	2.5	0.3	0.59	0.74	2.11	0.97
MMFH_dooo_1979 - 1983	18.9	7.4	5.1	2.8	0.3	0.39	0.80	2.57	0.67
MMFH_dooo_1984 - 1994	20.6	10.8	3.3	2.7	0.3	0.28	0.66	2.57	0.55
MMFH_dooo_1995 - 2001	21.9	12.4	2.9	2.7	0.3	0.19	0.28	1.60	0.34
MMFH_dooo_2002 - 2004	17.8	13.3	2.8	2.5	0.3	0.20	0.35	1.60	0.34
GMFH_fooo_bis 1918	28.6	12.2	4.4	2.8	0.3	2.60	1.45	2.15	1.37
GMFH_fooo_1919 - 1948	30.8	12.0	4.3	2.9	0.4	0.78	1.45	2.15	1.11
GMFH_fooo_1949 - 1957	29.8	12.1	3.5	2.7	0.3	2.08	1.21	2.11	1.55
GMFH_fooo_1958 - 1968	35.2	12.9	4.0	2.6	0.5	0.82	1.30	2.11	0.85
GMFH_fooo_1969 - 1978	27.5	13.3	6.2	2.5	0.3	0.82	1.46	2.11	0.97
GMFH_dooo_1979 - 1983	28.5	9.2	6.7	2.8	0.3	0.39	0.80	2.57	0.67
GMFH_dooo_1984 - 1994	46.3	15.4	3.8	2.7	0.3	0.28	0.66	2.57	0.55
GMFH_dooo_1995 - 2001	51.8	16.1	3.1	2.7	0.3	0.19	0.28	1.60	0.34
EFH_fdoo_bis 1918	13.5	7.7	1.8	2.3	0.2	0.69	1.90	2.15	1.04
EFH_fdoo_1919 - 1948	11.7	8.4	1.7	2.8	0.2	0.56	1.70	2.15	1.11
EFH_fdoo_1949 - 1957	12.6	8.2	1.7	2.4	0.2	0.94	0.93	2.11	1.01
EFH_fdoo_1958 - 1968	12.3	8.8	1.6	2.5	0.3	0.80	1.44	2.11	0.97
EFH_fdoo_1969 - 1978	13.9	8.8	1.5	2.6	0.3	0.57	1.21	2.11	0.85
EFH_dfoo_1979 - 1983	14.3	9.0	1.4	2.5	0.2	0.38	0.80	1.77	0.81
EFH_dfoo_1984 - 1994	12.7	9.7	1.5	2.5	0.3	0.28	0.68	1.77	0.55
EFH_dwoo_1995 - 2001	11.9	9.7	1.5	2.5	0.3	0.20	0.44	1.60	0.34
EFH_dwoo_2002 - 2004	12.1	10.2	1.4	2.4	0.2	0.20	0.32	1.60	0.40
EFH_dwoo_2005	12.4	11.2	1.3	2.4	0.2	0.20	0.32	1.60	0.40
EFH_dwoo_2006	12.4	10.2	1.5	2.4	0.2	0.20	0.32	1.60	0.40
EFH_dwoo_2007	13.2	9.3	1.4	2.4	0.2	0.20	0.32	1.60	0.40

Gebäudeklasse	Länge [m]	Breite [m]	Stock werke	Raum höhe	Anteil Fenster-fläche an Umfas-sungs-fläche	U-Wert Dach [W/m²K]	U-Wert Außen-wände [W/m²K]	U-Wert Fenster [W/m²K]	U-Wert unterer Gebäude-abschluss [W/m²K]
EFH_dwoo_2008	13.9	10.3	1.5	2.4	0.2	0.20	0.32	1.60	0.40
EFH_dwoo_ab 2009	11.1	9.9	1.4	2.4	0.2	0.20	0.32	1.60	0.40
RH_fdoo_bis 1918	11.0	6.5	2.1	2.9	0.1	0.46	1.70	2.15	0.91
RH_fdoo_1919 - 1948	10.9	7.6	1.7	2.6	0.1	0.46	1.39	2.15	1.60
RH_fdoo_1949 - 1957	10.0	8.1	1.9	2.6	0.2	0.69	0.86	2.11	1.01
RH_fdoo_1958 - 1968	10.1	7.5	1.9	2.5	0.1	1.03	1.44	2.11	0.97
RH_fdoo_1969 - 1978	10.4	8.0	1.8	2.5	0.2	0.48	0.80	2.11	0.97
RH_dfoo_1979 - 1983	10.5	8.1	1.8	2.5	0.1	0.38	0.68	1.77	0.67
RH_dfoo_1984 - 1994	9.5	8.6	1.9	2.5	0.2	0.28	0.77	1.77	0.55
RH_dwoo_1995 - 2001	10.1	8.4	1.8	2.5	0.1	0.20	0.43	1.60	0.32
RH_dwoo_2002 - 2004	10.0	8.4	1.8	2.5	0.3	0.13	0.22	1.60	0.29
RH_dwoo_2005	9.0	9.0	1.8	2.5	0.3	0.13	0.22	1.60	0.29
RH_dwoo_2006	9.2	8.6	2.2	2.5	0.3	0.13	0.22	1.60	0.29
RH_dwoo_2007	9.7	9.3	1.9	2.5	0.3	0.13	0.22	1.60	0.29
RH_dwoo_2008	9.0	9.0	2.1	2.5	0.3	0.13	0.22	1.60	0.29
KMFH_fdoo_bis 1918	14.4	9.0	2.6	2.6	0.2	0.78	1.90	2.15	1.04
KMFH_fdoo_1919 - 1948	13.3	10.0	2.4	2.8	0.2	0.62	1.64	2.15	1.11
KMFH_fdoo_1949 - 1957	12.4	10.2	2.5	2.7	0.3	0.98	1.44	2.11	1.65
KMFH_fdoo_1958 - 1968	14.3	9.7	2.7	2.6	0.5	1.68	1.21	2.11	0.97
KMFH_fdoo_1969 - 1978	13.8	10.9	2.4	2.5	0.3	0.54	0.74	2.11	0.97
KMFH_dfoo_1979 - 1983	16.0	10.3	2.5	2.8	0.3	0.39	0.80	1.77	0.67
KMFH_dfoo_1984 - 1994	14.0	11.9	2.3	2.7	0.3	0.28	0.66	1.77	0.55
KMFH_dwoo_1995 - 2001	15.0	10.2	2.5	2.7	0.3	0.19	0.26	1.60	0.34
KMFH_dwoo_2002 - 2004	12.5	12.5	2.6	2.5	0.3	0.20	0.32	1.60	0.34
KMFH_dwoo_2005	11.9	11.9	2.5	2.5	0.3	0.20	0.32	1.60	0.34
KMFH_dwoo_2006	12.5	12.5	2.5	2.5	0.3	0.20	0.32	1.60	0.34
KMFH_dwoo_2007	11.7	11.7	2.3	2.5	0.3	0.20	0.32	1.60	0.34
KMFH_dwoo_2008	17.6	17.6	1.7	2.5	0.3	0.20	0.32	1.60	0.34
MMFH_fdoo_bis 1918	20.0	9.9	3.4	2.6	0.2	0.78	1.90	2.15	1.04
MMFH_fdoo_1919 - 1948	15.6	10.9	4.0	2.8	0.2	0.62	1.64	2.15	1.11
MMFH_fdoo_1949 - 1957	14.1	11.9	3.7	2.7	0.3	0.98	1.44	2.11	1.65
MMFH_fdoo_1958 - 1968	16.6	10.4	3.8	2.6	0.5	1.68	1.21	2.11	0.97
MMFH_fdoo_1969 - 1978	14.5	11.9	3.9	2.5	0.3	0.54	0.74	2.11	0.97
MMFH_dfoo_1979 - 1983	18.9	7.4	5.1	2.8	0.3	0.39	0.80	1.77	0.67
MMFH_dfoo_1984 - 1994	20.6	10.8	3.3	2.7	0.3	0.28	0.66	1.77	0.55
MMFH_dwoo_1995 - 2001	21.9	12.4	2.9	2.7	0.3	0.19	0.26	1.60	0.34

Gebäudeklasse	Länge [m]	Breite [m]	Stock werke	Raum höhe	Anteil Fenster-fläche an Umfas-sungs-fläche	U-Wert Dach [W/m²K]	U-Wert Außen-wände [W/m²K]	U-Wert Fenster [W/m²K]	U-Wert unterer Gebäude-abschluss [W/m²K]
MMFH_dwoo_2002 - 2004	17.8	13.3	2.8	2.5	0.3	0.20	0.32	1.60	0.34
GMFH_fdoo_bis 1918	28.6	12.2	4.4	2.6	0.2	0.78	1.90	2.15	1.04
GMFH_fdoo_1919 - 1948	30.8	12.0	4.3	2.8	0.2	0.62	1.64	2.15	1.11
GMFH_fdoo_1949 - 1957	29.8	12.1	3.5	2.7	0.3	0.98	1.44	2.11	1.65
GMFH_fdoo_1958 - 1968	35.2	12.9	4.0	2.6	0.5	1.68	1.21	2.11	0.97
GMFH_fdoo_1969 - 1978	27.5	13.3	6.2	2.5	0.3	0.54	0.74	2.11	0.97
GMFH_dfoo_1979 - 1983	28.5	9.2	6.7	2.8	0.3	0.39	0.80	1.77	0.67
GMFH_dfoo_1984 - 1994	46.3	15.4	3.8	2.7	0.3	0.28	0.66	1.77	0.55
GMFH_dwoo_1995 - 2001	51.8	16.1	3.1	2.7	0.3	0.19	0.26	1.60	0.34
EFH_fdwo_bis 1918	13.5	7.7	1.8	2.3	0.2	0.69	0.90	2.15	1.04
EFH_fdwo_1919 - 1948	11.7	8.4	1.7	2.8	0.2	0.56	0.85	2.15	1.11
EFH_fdwo_1949 - 1957	12.6	8.2	1.7	2.4	0.2	0.94	0.84	2.11	1.01
EFH_fdwo_1958 - 1968	12.3	8.8	1.6	2.5	0.3	0.80	1.24	2.11	0.97
EFH_fdwo_1969 - 1978	13.9	8.8	1.5	2.6	0.3	0.57	1.06	2.11	0.85
EFH_dfwo_1979 - 1983	14.3	9.0	1.4	2.5	0.2	0.38	0.70	1.77	0.81
EFH_dfwo_1984 - 1994	12.7	9.7	1.5	2.5	0.3	0.28	0.60	1.77	0.55
EFH_dwko_1995 - 2001	11.9	9.7	1.5	2.5	0.3	0.20	0.44	1.60	0.32
EFH_dwko_2002 - 2004	12.1	10.2	1.4	2.4	0.2	0.20	0.32	1.60	0.37
EFH_dwko_2005	12.4	11.2	1.3	2.4	0.2	0.20	0.32	1.60	0.37
EFH_dwko_2006	12.4	10.2	1.5	2.4	0.2	0.20	0.32	1.60	0.37
EFH_dwko_2007	13.2	9.3	1.4	2.4	0.2	0.20	0.32	1.60	0.37
EFH_dwko_2008	13.9	10.3	1.5	2.4	0.2	0.20	0.32	1.60	0.37
EFH_dwko_ab 2009	11.1	9.9	1.4	2.4	0.2	0.20	0.32	1.60	0.37
RH_fdwo_bis 1918	11.0	6.5	2.1	2.9	0.1	0.46	0.85	2.15	0.91
RH_fdwo_1919 - 1948	10.9	7.6	1.7	2.6	0.1	0.46	0.77	2.15	1.60
RH_fdwo_1949 - 1957	10.0	8.1	1.9	2.6	0.2	0.69	0.78	2.11	1.01
RH_fdwo_1958 - 1968	10.1	7.5	1.9	2.5	0.1	1.03	1.24	2.11	0.97
RH_fdwo_1969 - 1978	10.4	8.0	1.8	2.5	0.2	0.48	0.73	2.11	0.97
RH_dfwo_1979 - 1983	10.5	8.1	1.8	2.5	0.1	0.38	0.60	1.77	0.67
RH_dfwo_1984 - 1994	9.5	8.6	1.9	2.5	0.2	0.28	0.67	1.77	0.55
RH_dwko_1995 - 2001	10.1	8.4	1.8	2.5	0.1	0.20	0.43	1.60	0.30
RH_dwko_2002 - 2004	10.0	8.4	1.8	2.5	0.3	0.13	0.22	1.60	0.27
RH_dwko_2005	9.0	9.0	1.8	2.5	0.3	0.13	0.22	1.60	0.27
RH_dwko_2006	9.2	8.6	2.2	2.5	0.3	0.13	0.22	1.60	0.27
RH_dwko_2007	9.7	9.3	1.9	2.5	0.3	0.13	0.22	1.60	0.27
RH_dwko_2008	9.0	9.0	2.1	2.5	0.3	0.13	0.22	1.60	0.27

Gebäudeklasse	Länge [m]	Breite [m]	Stock werke	Raum höhe	Anteil Fenster-fläche an Umfas-sungs-fläche	U-Wert Dach [W/m²K]	U-Wert Außen-wände [W/m²K]	U-Wert Fenster [W/m²K]	U-Wert unterer Gebäude-abschluss [W/m²K]
KMFH_fdwo_bis 1918	14.4	9.0	2.6	2.6	0.2	0.78	0.90	2.15	1.04
KMFH_fdwo_1919 - 1948	13.3	10.0	2.4	2.8	0.2	0.62	0.84	2.15	1.11
KMFH_fdwo_1949 - 1957	12.4	10.2	2.5	2.7	0.3	0.98	1.24	2.11	1.65
KMFH_fdwo_1958 - 1968	14.3	9.7	2.7	2.6	0.5	1.68	1.06	2.11	0.97
KMFH_fdwo_1969 - 1978	13.8	10.9	2.4	2.5	0.3	0.54	0.68	2.11	0.97
KMFH_dfwo_1979 - 1983	16.0	10.3	2.5	2.8	0.3	0.39	0.70	1.77	0.67
KMFH_dfwo_1984 - 1994	14.0	11.9	2.3	2.7	0.3	0.28	0.59	1.77	0.55
KMFH_dwko_1995 - 2001	15.0	10.2	2.5	2.7	0.3	0.19	0.26	1.60	0.32
KMFH_dwko_2002 - 2004	12.5	12.5	2.6	2.5	0.3	0.20	0.32	1.60	0.32
KMFH_dwko_2005	11.9	11.9	2.5	2.5	0.3	0.20	0.32	1.60	0.32
KMFH_dwko_2006	12.5	12.5	2.5	2.5	0.3	0.20	0.32	1.60	0.32
KMFH_dwko_2007	11.7	11.7	2.3	2.5	0.3	0.20	0.32	1.60	0.32
KMFH_dwko_2008	17.6	17.6	1.7	2.5	0.3	0.20	0.32	1.60	0.32
MMFH_fdwo_bis 1918	20.0	9.9	3.4	2.6	0.2	0.78	0.90	2.15	1.04
MMFH_fdwo_1919 - 1948	15.6	10.9	4.0	2.8	0.2	0.62	0.84	2.15	1.11
MMFH_fdwo_1949 - 1957	14.1	11.9	3.7	2.7	0.3	0.98	1.24	2.11	1.65
MMFH_fdwo_1958 - 1968	16.6	10.4	3.8	2.6	0.5	1.68	1.06	2.11	0.97
MMFH_fdwo_1969 - 1978	14.5	11.9	3.9	2.5	0.3	0.54	0.68	2.11	0.97
MMFH_dfwo_1979 - 1983	18.9	7.4	5.1	2.8	0.3	0.39	0.70	1.77	0.67
MMFH_dfwo_1984 - 1994	20.6	10.8	3.3	2.7	0.3	0.28	0.59	1.77	0.55
MMFH_dwko_1995 - 2001	21.9	12.4	2.9	2.7	0.3	0.19	0.26	1.60	0.32
MMFH_dwko_2002 - 2004	17.8	13.3	2.8	2.5	0.3	0.20	0.32	1.60	0.32
GMFH_fdwo_bis 1918	28.6	12.2	4.4	2.6	0.2	0.78	0.90	2.15	1.04
GMFH_fdwo_1919 - 1948	30.8	12.0	4.3	2.8	0.2	0.62	0.84	2.15	1.11
GMFH_fdwo_1949 - 1957	29.8	12.1	3.5	2.7	0.3	0.98	1.24	2.11	1.65
GMFH_fdwo_1958 - 1968	35.2	12.9	4.0	2.6	0.5	1.68	1.06	2.11	0.97
GMFH_fdwo_1969 - 1978	27.5	13.3	6.2	2.5	0.3	0.54	0.68	2.11	0.97
GMFH_dfwo_1979 - 1983	28.5	9.2	6.7	2.8	0.3	0.39	0.70	1.77	0.67
GMFH_dfwo_1984 - 1994	46.3	15.4	3.8	2.7	0.3	0.28	0.59	1.77	0.55
GMFH_dwko_1995 - 2001	51.8	16.1	3.1	2.7	0.3	0.19	0.26	1.60	0.32
EFH_fdwk_bis 1918	13.5	7.7	1.8	2.3	0.2	0.69	0.90	2.15	0.67
EFH_fdwk_1919 - 1948	11.7	8.4	1.7	2.8	0.2	0.56	0.85	2.15	0.69
EFH_fdwk_1949 - 1957	12.6	8.2	1.7	2.4	0.2	0.94	0.84	2.11	0.93
EFH_fdwk_1958 - 1968	12.3	8.8	1.6	2.5	0.3	0.80	1.24	2.11	0.89
EFH_fdwk_1969 - 1978	13.9	8.8	1.5	2.6	0.3	0.57	1.06	2.11	0.79
EFH_dfwk_1979 - 1983	14.3	9.0	1.4	2.5	0.2	0.38	0.70	1.77	0.72

Gebäudeklasse	Länge [m]	Breite [m]	Stock werke	Raum höhe	Anteil Fenster-fläche an Umfas-sungs-fläche	U-Wert Dach [W/m²K]	U-Wert Außen-wände [W/m²K]	U-Wert Fenster [W/m²K]	U-Wert unterer Gebäude-abschluss [W/m²K]
EFH_dfwk_1984 - 1994	12.7	9.7	1.5	2.5	0.3	0.28	0.60	1.77	0.51
EFH_dwkf_1995 - 2001	11.9	9.7	1.5	2.5	0.3	0.20	0.44	1.58	0.32
EFH_dwkf_2002 - 2004	12.1	10.2	1.4	2.4	0.2	0.20	0.32	1.50	0.37
EFH_dwkf_2005	12.4	11.2	1.3	2.4	0.2	0.20	0.32	1.50	0.37
EFH_dwkf_2006	12.4	10.2	1.5	2.4	0.2	0.20	0.32	1.48	0.37
EFH_dwkf_2007	13.2	9.3	1.4	2.4	0.2	0.20	0.32	1.44	0.37
EFH_dwkf_2008	13.9	10.3	1.5	2.4	0.2	0.20	0.32	1.40	0.37
EFH_dwkf_ab 2009	11.1	9.9	1.4	2.4	0.2	0.20	0.32	1.30	0.37
RH_fdwk_bis 1918	11.0	6.5	2.1	2.9	0.1	0.46	0.85	2.15	0.61
RH_fdwk_1919 - 1948	10.9	7.6	1.7	2.6	0.1	0.46	0.77	2.15	0.86
RH_fdwk_1949 - 1957	10.0	8.1	1.9	2.6	0.2	0.69	0.78	2.11	0.93
RH_fdwk_1958 - 1968	10.1	7.5	1.9	2.5	0.1	1.03	1.24	2.11	0.89
RH_fdwk_1969 - 1978	10.4	8.0	1.8	2.5	0.2	0.48	0.73	2.11	0.89
RH_dfwk_1979 - 1983	10.5	8.1	1.8	2.5	0.1	0.38	0.60	1.77	0.61
RH_dfwk_1984 - 1994	9.5	8.6	1.9	2.5	0.2	0.28	0.67	1.77	0.51
RH_dwkf_1995 - 2001	10.1	8.4	1.8	2.5	0.1	0.20	0.43	1.58	0.30
RH_dwkf_2002 - 2004	10.0	8.4	1.8	2.5	0.3	0.13	0.22	1.50	0.27
RH_dwkf_2005	9.0	9.0	1.8	2.5	0.3	0.13	0.22	1.50	0.27
RH_dwkf_2006	9.2	8.6	2.2	2.5	0.3	0.13	0.22	1.48	0.27
RH_dwkf_2007	9.7	9.3	1.9	2.5	0.3	0.13	0.22	1.44	0.27
RH_dwkf_2008	9.0	9.0	2.1	2.5	0.3	0.13	0.22	1.40	0.27
KMFH_fdwk_bis 1918	14.4	9.0	2.6	2.6	0.2	0.78	0.90	2.15	0.67
KMFH_fdwk_1919 - 1948	13.3	10.0	2.4	2.8	0.2	0.62	0.84	2.15	0.69
KMFH_fdwk_1949 - 1957	12.4	10.2	2.5	2.7	0.3	0.98	1.24	2.11	1.44
KMFH_fdwk_1958 - 1968	14.3	9.7	2.7	2.6	0.5	1.68	1.06	2.11	0.89
KMFH_fdwk_1969 - 1978	13.8	10.9	2.4	2.5	0.3	0.54	0.68	2.11	0.89
KMFH_dfwk_1979 - 1983	16.0	10.3	2.5	2.8	0.3	0.39	0.70	1.77	0.61
KMFH_dfwk_1984 - 1994	14.0	11.9	2.3	2.7	0.3	0.28	0.59	1.77	0.51
KMFH_dwkf_1995 - 2001	15.0	10.2	2.5	2.7	0.3	0.19	0.26	1.58	0.32
KMFH_dwkf_2002 - 2004	12.5	12.5	2.6	2.5	0.3	0.20	0.32	1.50	0.32
KMFH_dwkf_2005	11.9	11.9	2.5	2.5	0.3	0.20	0.32	1.50	0.32
KMFH_dwkf_2006	12.5	12.5	2.5	2.5	0.3	0.20	0.32	1.48	0.32
KMFH_dwkf_2007	11.7	11.7	2.3	2.5	0.3	0.20	0.32	1.44	0.32
KMFH_dwkf_2008	17.6	17.6	1.7	2.5	0.3	0.20	0.32	1.40	0.32
MMFH_fdwk_bis 1918	20.0	9.9	3.4	2.6	0.2	0.78	0.90	2.15	0.67
MMFH_fdwk_1919 - 1948	15.6	10.9	4.0	2.8	0.2	0.62	0.84	2.15	0.69

Gebäudeklasse	Länge [m]	Breite [m]	Stock werke	Raum höhe	Anteil Fenster-fläche an Umfas-sungs-fläche	U-Wert Dach [W/m²K]	U-Wert Außen-wände [W/m²K]	U-Wert Fenster [W/m²K]	U-Wert unterer Gebäude-abschluss [W/m²K]
MMFH_fdwk_1949 - 1957	14.1	11.9	3.7	2.7	0.3	0.98	1.24	2.11	1.44
MMFH_fdwk_1958 - 1968	16.6	10.4	3.8	2.6	0.5	1.68	1.06	2.11	0.89
MMFH_fdwk_1969 - 1978	14.5	11.9	3.9	2.5	0.3	0.54	0.68	2.11	0.89
MMFH_dfwk_1979 - 1983	18.9	7.4	5.1	2.8	0.3	0.39	0.70	1.77	0.61
MMFH_dfwk_1984 - 1994	20.6	10.8	3.3	2.7	0.3	0.28	0.59	1.77	0.51
MMFH_dwkf_1995 - 2001	21.9	12.4	2.9	2.7	0.3	0.19	0.26	1.58	0.32
MMFH_dwkf_2002 - 2004	17.8	13.3	2.8	2.5	0.3	0.20	0.32	1.50	0.32
GMFH_fdwk_bis 1918	28.6	12.2	4.4	2.6	0.2	0.78	0.90	2.15	0.67
GMFH_fdwk_1919 - 1948	30.8	12.0	4.3	2.8	0.2	0.62	0.84	2.15	0.69
GMFH_fdwk_1949 - 1957	29.8	12.1	3.5	2.7	0.3	0.98	1.24	2.11	1.44
GMFH_fdwk_1958 - 1968	35.2	12.9	4.0	2.6	0.5	1.68	1.06	2.11	0.89
GMFH_fdwk_1969 - 1978	27.5	13.3	6.2	2.5	0.3	0.54	0.68	2.11	0.89
GMFH_dfwk_1979 - 1983	28.5	9.2	6.7	2.8	0.3	0.39	0.70	1.77	0.61
GMFH_dfwk_1984 - 1994	46.3	15.4	3.8	2.7	0.3	0.28	0.59	1.77	0.51
GMFH_dwkf_1995 - 2001	51.8	16.1	3.1	2.7	0.3	0.19	0.26	1.58	0.32
EFH_oooo_bis 1918	13.5	7.7	1.8	2.3	0.2	1.80	1.90	5.20	1.04
EFH_oooo_1919 - 1948	11.7	8.4	1.7	2.8	0.2	1.11	1.70	2.57	1.11
EFH_oooo_1949 - 1957	12.6	8.2	1.7	2.4	0.2	1.11	0.93	2.57	1.01
EFH_oooo_1958 - 1968	12.3	8.8	1.6	2.5	0.3	0.92	1.44	2.90	0.97
EFH_oooo_1969 - 1978	13.9	8.8	1.5	2.6	0.3	0.63	1.21	2.57	0.85
EFH_oooo_1979 - 1983	14.3	9.0	1.4	2.5	0.2	0.43	0.80	4.30	0.81
EFH_oooo_1984 - 1994	12.7	9.7	1.5	2.5	0.3	0.30	0.68	2.57	0.55
EFH_oooo_1995 - 2001	11.9	9.7	1.5	2.5	0.3	0.22	0.50	1.60	0.34
EFH_oooo_2002 - 2004	12.1	10.2	1.4	2.4	0.2	0.22	0.35	1.60	0.40
EFH_oooo_2005	12.4	11.2	1.3	2.4	0.2	0.22	0.35	1.60	0.40
EFH_oooo_2006	12.4	10.2	1.5	2.4	0.2	0.22	0.35	1.60	0.40
EFH_oooo_2007	13.2	9.3	1.4	2.4	0.2	0.22	0.35	1.60	0.40
EFH_oooo_2008	13.9	10.3	1.5	2.4	0.2	0.22	0.35	1.60	0.40
EFH_oooo_ab 2009	11.1	9.9	1.4	2.4	0.2	0.22	0.35	1.60	0.40
RH_oooo_bis 1918	11.0	6.5	2.1	2.9	0.1	0.78	1.70	2.57	0.91
RH_oooo_1919 - 1948	10.9	7.6	1.7	2.6	0.1	0.78	1.39	2.80	1.60
RH_oooo_1949 - 1957	10.0	8.1	1.9	2.6	0.2	0.78	0.86	2.90	1.01
RH_oooo_1958 - 1968	10.1	7.5	1.9	2.5	0.1	1.23	1.44	2.57	0.97
RH_oooo_1969 - 1978	10.4	8.0	1.8	2.5	0.2	0.52	0.80	4.30	0.97
RH_oooo_1979 - 1983	10.5	8.1	1.8	2.5	0.1	0.43	0.68	2.57	0.67
RH_oooo_1984 - 1994	9.5	8.6	1.9	2.5	0.2	0.30	0.77	2.57	0.55

Gebäudeklasse	Länge [m]	Breite [m]	Stock werke	Raum höhe	Anteil Fenster-fläche an Umfas-sungs-fläche	U-Wert Dach [W/m²K]	U-Wert Außen-wände [W/m²K]	U-Wert Fenster [W/m²K]	U-Wert unterer Gebäude-abschluss [W/m²K]
RH_oooo_1995 - 2001	10.1	8.4	1.8	2.5	0.1	0.22	0.49	1.60	0.32
RH_oooo_2002 - 2004	10.0	8.4	1.8	2.5	0.3	0.14	0.24	1.60	0.29
RH_oooo_2005	9.0	9.0	1.8	2.5	0.3	0.14	0.24	1.60	0.29
RH_oooo_2006	9.2	8.6	2.2	2.5	0.3	0.14	0.24	1.60	0.29
RH_oooo_2007	9.7	9.3	1.9	2.5	0.3	0.14	0.24	1.60	0.29
RH_oooo_2008	9.0	9.0	2.1	2.5	0.3	0.14	0.24	1.60	0.29
KMFH_oooo_bis 1918	14.4	9.0	2.6	2.6	0.2	2.60	1.90	2.57	1.04
KMFH_oooo_1919 - 1948	13.3	10.0	2.4	2.8	0.2	1.41	1.64	4.30	1.11
KMFH_oooo_1949 - 1957	12.4	10.2	2.5	2.7	0.3	1.17	1.44	2.80	1.65
KMFH_oooo_1958 - 1968	14.3	9.7	2.7	2.6	0.5	2.30	1.21	2.57	0.97
KMFH_oooo_1969 - 1978	13.8	10.9	2.4	2.5	0.3	0.59	0.74	2.80	0.97
KMFH_oooo_1979 - 1983	16.0	10.3	2.5	2.8	0.3	0.44	0.80	2.57	0.67
KMFH_oooo_1984 - 1994	14.0	11.9	2.3	2.7	0.3	0.30	0.66	2.57	0.55
KMFH_oooo_1995 - 2001	15.0	10.2	2.5	2.7	0.3	0.21	0.28	1.60	0.34
KMFH_oooo_2002 - 2004	12.5	12.5	2.6	2.5	0.3	0.22	0.35	1.60	0.34
KMFH_oooo_2005	11.9	11.9	2.5	2.5	0.3	0.22	0.35	1.60	0.34
KMFH_oooo_2006	12.5	12.5	2.5	2.5	0.3	0.22	0.35	1.60	0.34
KMFH_oooo_2007	11.7	11.7	2.3	2.5	0.3	0.22	0.35	1.60	0.34
KMFH_oooo_2008	17.6	17.6	1.7	2.5	0.3	0.22	0.35	1.60	0.34
MMFH_oooo_bis 1918	20.0	9.9	3.4	2.6	0.2	2.60	1.90	2.57	1.04
MMFH_oooo_1919 - 1948	15.6	10.9	4.0	2.8	0.2	1.41	1.64	4.30	1.11
MMFH_oooo_1949 - 1957	14.1	11.9	3.7	2.7	0.3	1.17	1.44	2.80	1.65
MMFH_oooo_1958 - 1968	16.6	10.4	3.8	2.6	0.5	2.30	1.21	2.57	0.97
MMFH_oooo_1969 - 1978	14.5	11.9	3.9	2.5	0.3	0.59	0.74	2.80	0.97
MMFH_oooo_1979 - 1983	18.9	7.4	5.1	2.8	0.3	0.44	0.80	2.57	0.67
MMFH_oooo_1984 - 1994	20.6	10.8	3.3	2.7	0.3	0.30	0.66	2.57	0.55
MMFH_oooo_1995 - 2001	21.9	12.4	2.9	2.7	0.3	0.21	0.28	1.60	0.34
MMFH_oooo_2002 - 2004	17.8	13.3	2.8	2.5	0.3	0.22	0.35	1.60	0.34
GMFH_oooo_bis 1918	28.6	12.2	4.4	2.6	0.2	2.60	1.90	2.57	1.04
GMFH_oooo_1919 - 1948	30.8	12.0	4.3	2.8	0.2	1.41	1.64	4.30	1.11
GMFH_oooo_1949 - 1957	29.8	12.1	3.5	2.7	0.3	1.17	1.44	2.80	1.65
GMFH_oooo_1958 - 1968	35.2	12.9	4.0	2.6	0.5	2.30	1.21	2.57	0.97
GMFH_oooo_1969 - 1978	27.5	13.3	6.2	2.5	0.3	0.59	0.74	2.80	0.97
GMFH_oooo_1979 - 1983	28.5	9.2	6.7	2.8	0.3	0.44	0.80	2.57	0.67
GMFH_oooo_1984 - 1994	46.3	15.4	3.8	2.7	0.3	0.30	0.66	2.57	0.55
GMFH_oooo_1995 - 2001	51.8	16.1	3.1	2.7	0.3	0.21	0.28	1.60	0.34

Gebäudeklasse	Länge [m]	Breite [m]	Stock werke	Raum höhe	Anteil Fenster-fläche an Umfas-sungs-fläche	U-Wert Dach [W/m²K]	U-Wert Außen-wände [W/m²K]	U-Wert Fenster [W/m²K]	U-Wert unterer Gebäude-abschluss [W/m²K]
Baugewerbe_WG-Mischnutz_A	7.6	4.2	3.6	2.6	0.3	1.09	1.21	2.40	1.10
Baugewerbe_WG-Mischnutz_B	7.6	4.2	3.6	2.6	0.3	0.33	0.70	2.46	0.60
Baugewerbe_WG-Mischnutz_C	7.6	4.2	3.6	2.6	0.3	0.20	0.30	1.60	0.33
Baugewerbe_Werkstätten_Lager	17.8	7.1	2.0	4.5	0.2	1.50	1.50	2.40	1.50
BüroähnlicheBetriebe_WG-Mischnutz_privat_A	6.8	3.8	3.6	2.6	0.3	1.09	1.21	2.40	1.10
BüroähnlicheBetriebe_WG-Mischnutz_privat_B	6.8	3.8	3.6	2.6	0.3	0.33	0.70	2.46	0.60
BüroähnlicheBetriebe_WG-Mischnutz_privat_C	6.8	3.8	3.6	2.6	0.3	0.20	0.30	1.60	0.33
BüroähnlicheBetriebe_WG-Mischnutz_öfftl_A	6.8	3.8	3.6	2.6	0.3	1.09	1.21	2.40	1.10
BüroähnlicheBetriebe_WG-Mischnutz_öfftl_B	6.8	3.8	3.6	2.6	0.3	0.33	0.70	2.46	0.60
BüroähnlicheBetriebe_WG-Mischnutz_öfftl_C	6.8	3.8	3.6	2.6	0.3	0.20	0.30	1.60	0.33
BüroähnlicheBetriebe_Bürogebäude_privat_A	21.6	5.4	2.6	2.9	0.4	1.00	1.50	2.90	1.20
BüroähnlicheBetriebe_Bürogebäude_privat_B	21.6	5.4	2.6	2.9	0.4	0.36	0.99	2.29	0.61
BüroähnlicheBetriebe_Bürogebäude_privat_C	21.6	5.4	2.6	2.9	0.4	0.30	0.35	1.30	0.40
BüroähnlicheBetriebe_Bürogebäude_öfftl_A	21.6	5.4	2.6	2.9	0.4	1.00	1.50	2.90	1.20
BüroähnlicheBetriebe_Bürogebäude_öfftl_B	21.6	5.4	2.6	2.9	0.4	0.36	0.99	2.29	0.61
BüroähnlicheBetriebe_Bürogebäude_öfftl_C	21.6	5.4	2.6	2.9	0.4	0.30	0.35	1.30	0.40
Herstellungsbetriebe_WG-Mischnutz_A	7.9	4.4	3.6	2.6	0.3	1.09	1.21	2.40	1.10
Herstellungsbetriebe_WG-Mischnutz_B	7.9	4.4	3.6	2.6	0.3	0.33	0.70	2.46	0.60
Herstellungsbetriebe_WG-Mischnutz_C	7.9	4.4	3.6	2.6	0.3	0.20	0.30	1.60	0.33
Herstellungsbetriebe_Werkstätten	16.1	6.4	3.5	4.5	0.2	1.50	1.50	2.40	1.50
KFZ_Gewerbe_WG-Mischnutz_A	12.8	7.1	3.6	2.6	0.3	1.09	1.21	2.40	1.10
KFZ_Gewerbe_WG-Mischnutz_B	12.8	7.1	3.6	2.6	0.3	0.33	0.70	2.46	0.60
KFZ_Gewerbe_WG-Mischnutz_C	12.8	7.1	3.6	2.6	0.3	0.20	0.30	1.60	0.33
KFZ_Gewerbe_Werkstätten	17.1	6.8	3.5	4.5	0.2	1.50	1.50	2.40	1.50
Handel_WG-Mischnutz_A	7.4	4.1	3.6	2.6	0.3	1.09	1.21	2.40	1.10
Handel_WG-Mischnutz_B	7.4	4.1	3.6	2.6	0.3	0.33	0.70	2.46	0.60
Handel_WG-Mischnutz_C	7.4	4.1	3.6	2.6	0.3	0.20	0.30	1.60	0.33
Handel_Verkaufs-Bürogebäude_A	26.6	8.9	1.8	2.9	0.2	1.00	1.50	2.90	1.20
Handel_Verkaufs-Bürogebäude_B	26.6	8.9	1.8	2.9	0.2	0.36	0.99	2.29	0.61
Handel_Verkaufs-Bürogebäude_C	26.6	8.9	1.8	2.9	0.2	0.30	0.35	1.30	0.40
Handel_Lager	26.8	13.4	1.9	3.5	0.2	1.50	1.50	2.40	1.50
Krankenhäuser_privat_A	140.2	11.7	2.3	3.3	0.2	1.00	1.50	2.90	1.20

Gebäudeklasse	Länge [m]	Breite [m]	Stock werke	Raum höhe	Anteil Fenster-fläche an Umfas-sungs-fläche	U-Wert Dach [W/m²K]	U-Wert Außen-wände [W/m²K]	U-Wert Fenster [W/m²K]	U-Wert unterer Gebäude-abschluss [W/m²K]
Krankenhäuser_privat_B	140.2	11.7	2.3	3.3	0.2	0.36	0.99	2.29	0.61
Krankenhäuser_privat_C	140.2	11.7	2.3	3.3	0.2	0.30	0.35	1.30	0.40
Krankenhäuser_öfftl_A	140.2	11.7	2.3	3.3	0.2	1.00	1.50	2.90	1.20
Krankenhäuser_öfftl_B	140.2	11.7	2.3	3.3	0.2	0.36	0.99	2.29	0.61
Krankenhäuser_öfftl_C	140.2	11.7	2.3	3.3	0.2	0.30	0.35	1.30	0.40
Schulen_privat_A	65.1	14.5	2.4	3.3	0.2	1.00	1.50	2.90	1.20
Schulen_privat_B	65.1	14.5	2.4	3.3	0.2	0.36	0.99	2.29	0.61
Schulen_privat_C	65.1	14.5	2.4	3.3	0.2	0.30	0.35	1.30	0.40
Schulen_öfftl_A	65.1	14.5	2.4	3.3	0.2	1.00	1.50	2.90	1.20
Schulen_öfftl_B	65.1	14.5	2.4	3.3	0.2	0.36	0.99	2.29	0.61
Schulen_öfftl_C	65.1	14.5	2.4	3.3	0.2	0.30	0.35	1.30	0.40
Bäder	25.2	8.4	2.2	4.5	0.2	0.36	0.99	2.29	0.61
Beherbergung_WG-Mischnutz_A	12.2	6.8	3.6	2.6	0.3	1.09	1.21	2.40	1.10
Beherbergung_WG-Mischnutz_B	12.2	6.8	3.6	2.6	0.3	0.33	0.70	2.46	0.60
Beherbergung_WG-Mischnutz_C	12.2	6.8	3.6	2.6	0.3	0.20	0.30	1.60	0.33
Beherbergung_A	35.9	12.0	2.3	2.9	0.3	1.00	1.50	2.90	1.20
Beherbergung_B	35.9	12.0	2.3	2.9	0.3	0.36	0.99	2.29	0.61
Beherbergung_C	35.9	12.0	2.3	2.9	0.3	0.30	0.35	1.30	0.40
Gaststätten_WG-Mischnutz_A	8.1	4.5	3.6	2.6	0.3	1.09	1.21	2.40	1.10
Gaststätten_WG-Mischnutz_B	8.1	4.5	3.6	2.6	0.3	0.33	0.70	2.46	0.60
Gaststätten_WG-Mischnutz_C	8.1	4.5	3.6	2.6	0.3	0.20	0.30	1.60	0.33
Gaststätten_A	17.8	5.9	1.9	2.9	0.3	1.00	1.50	2.90	1.20
Gaststätten_B	17.8	5.9	1.9	2.9	0.3	0.36	0.99	2.29	0.61
Gaststätten_C	17.8	5.9	1.9	2.9	0.3	0.30	0.35	1.30	0.40
OrgOhneErwerbszweck&Heime_WG-Mischnutz_A	8.4	4.7	3.6	2.6	0.3	1.09	1.21	2.40	1.10
OrgOhneErwerbszweck&Heime_WG-Mischnutz_B	8.4	4.7	3.6	2.6	0.3	0.33	0.70	2.46	0.60
OrgOhneErwerbszweck&Heime_WG-Mischnutz_C	8.4	4.7	3.6	2.6	0.3	0.20	0.30	1.60	0.33
OrgOErwerbszweck&Heime_privat_A	30.5	10.2	2.2	2.9	0.3	1.00	1.50	2.90	1.20
OrgOErwerbszweck&Heime_privat_B	30.5	10.2	2.2	2.9	0.3	0.36	0.99	2.29	0.61
OrgOErwerbszweck&Heime_privat_C	30.5	10.2	2.2	2.9	0.3	0.30	0.35	1.30	0.40
OrgOErwerbszweck&Heime_öfftl_A	30.5	10.2	2.2	2.9	0.3	1.00	1.50	2.90	1.20
OrgOErwerbszweck&Heime_öfftl_B	30.5	10.2	2.2	2.9	0.3	0.36	0.99	2.29	0.61
OrgOErwerbszweck&Heime_öfftl_C	30.5	10.2	2.2	2.9	0.3	0.30	0.35	1.30	0.40
Nahrungsmittelgewerbe	20.6	6.9	3.0	2.9	0.2	0.33	0.70	2.46	0.60
Wäschereien	11.6	3.9	3.0	2.9	0.2	0.33	0.70	2.46	0.60

Gebäudeklasse	Länge [m]	Breite [m]	Stock werke	Raum höhe	Anteil Fenster-fläche an Umfas-sungs-fläche	U-Wert Dach [W/m²K]	U-Wert Außen-wände [W/m²K]	U-Wert Fenster [W/m²K]	U-Wert unterer Gebäude-abschluss [W/m²K]
Textil_Bekleidung_Spedition	59.6	23.8	1.7	3.3	0.2	0.36	0.99	2.29	0.61
Militär	122.7	27.3	3.5	3.3	0.2	1.50	1.50	2.40	1.50
Flughäfen	230.1	15.3	3.0	4.5	0.3	1.50	1.50	2.40	1.50

A.2 Fragebogen und Ergebnisse der Komfortbewertung aus Expertenbefragung

Experte:	xxx
Fachgebiet/Beruf	xxx
Position/ Institution/ Firma	xxx

Bewertung	***Beschreibung***
1	trift überhaupt nicht zu
2	
3	
4	
5	
6	trifft voll und ganz zu

Wärmeversorgungssystem (WV)	Es besteht eingeringer Arbeitsaufwand im Betrieb (hoher Grad der Autonomie)	Es ist ein geringer Platzbedarf für Technik und Brennstoff-lagerung erforderlich	Das WV weist eine niedrige Geräusch-entwicklung auf	Die Geruchs-belastung durch das WV ist gering	Das WV ist förderlich für das Wohnambiente	Mittelwert
Kommentar zu Kategorie/ Weitere andere Kategorievorschläge						
Fernwärme						
Nahwärme biogen - gasförmig						
Nahwärme biogen - fest						
Erdgas Einzel						
Erdgas Niedertemperatur						
Erdgas Brennwert						
Biogas Brennwert						
Flüssiggas zentral						
Heizöl Einzel						
Heizöl Niedertemperatur						
Heizöl Brennwert						
Kohle zentral						
Kohle Einzel						
Elektrische Direktheizung						
Elektrische Einzelheizgeräte						
Elektrische Nachtspeicherheizung						
Wärmepumpe Erdreich/Grundwasser						
Wärmepumpe Luft						
Gaswärmepumpe						
Holzpellet zentral						
Hackschnitzel zentral						
Scheitholz zentral						
Holzpellets Einzel						
Holz Einzel						
BHKW alt						
BHKW Heizöl						
BHKW Pflanzenöl						
BHKW Erdgas						
BHKW Biogas						
Bio-Heizöl Brennwert						
Solarthermie Warmwasser						
Solarthermie Heizungsunterstüzung						

Abbildung A.1: Fragebogen zur Bewertung des Komfortnutzens von Wärmeversorgungssystemen

Tabelle A.3: Mittelwerte der Experteneinschätzung auf einer Skala von (1) „trifft überhaupt nicht zu“ bis (6) „trifft voll und ganz zu“

Wärmeversorgungssysteme	Autonomie im Betrieb	Geringer Platzbedarf für Technik/ Brennstoff	Niedrige Geräuschentwicklung	Niedrige Geruchsbelastung	Förderlich für das Wohnambiente	Mittelwert
Fernwärme	6	6	6	6	5	5.8
Nahwärme biogen - Biogas	6	6	6	5.75	5	5.75
Nahwärme biogen - fest	6	6	6	6	5	5.8
Erdgas zentral	5.25	4.5	5.25	5.75	5	5.15
Erdgas Einzel	4.5	3.25	4	5.25	3.5	4.1
Erdgas Niedertemperatur	5.25	4.5	5.25	5.75	5	5.15
Erdgas Brennwert	5.25	4.5	5.25	5.75	5	5.15
Biogas Brennwert	5.25	4.5	5.25	5.75	5	5.15
Flüssiggas zentral	4.25	3.25	5.25	5.75	5	4.7
Heizöl Einzel	3	1.75	4	3	2.5	2.85
Heizöl Niedertemperatur	4.5	2.75	5.25	4.5	5	4.4
Heizöl Brennwert	4.5	2.75	5.25	4.5	5	4.4
Kohle zentral	2.25	1.25	4.75	3.25	4.75	3.25
Kohle Einzel	1.25	1.25	3	1.75	1.75	1.8
Elektrische Direktheizung	5.5	5	5.5	6	4.25	5.25
Elektrische Einzelheizgeräte	4.75	4.75	4.75	6	3.5	4.75
Elektrische Nachtspeicherheizung	5.5	4.75	5.5	6	3.75	5.1
Wärmepumpe Erdreich/Grundwasser	5.25	3.5	5	6	5	4.95
Wärmepumpe Luft	5.25	4	4	6	5	4.85
Holzpellet zentral	4	2.25	4.5	5.5	5	4.25
Hackschnitzel zentral	4	2	4.5	5.5	5	4.2
Scheitholz zentral	2.25	1.75	5.25	5.5	5	3.95
Holzpellets Einzel	3	1.75	4.75	5.25	5.25	4
Holz Einzel	1.75	1.75	4.5	5	5.75	3.75
BHKW alt	5.25	3.5	4	5.75	5	4.7
BHKW Heizöl	4.75	2.5	4	4.5	5	4.15
BHKW Pflanzenöl	4.75	2.75	4	5.25	5	4.35
BHKW Erdgas	5.25	3.75	4	5.75	5	4.75
BHKW Biogas	5.25	3.75	4	5.75	5	4.75
Bio-Heizöl Brennwert	4.75	3	5.25	5.25	5	4.65
Solarthermie	5.25	4.25	5.75	6	5.25	5.3

Literaturverzeichnis

Achtnicht, Martin. 2010. „Do environmental benefits matter? A choice experiment among house owners in Germany ZEW“. *ECONSTAR-ZEW Discussion Papers* 10-094.

AGEB. 2010. „Satellitenbilanz Erneuerbare Energien“. *Arbeitsgemeinschaft Energiebilanzen*. Abgerufen Januar 14, 2014 (http://www.ag-energiebilanzen.de/index.php?article_id=7&clang=0).

AGEB, Hans-joachim Ziesing, Clemens Rohde, Heinrich Kleeberger, Peter Tzscheutschler, Bernd Geiger, Manuel Frondel, und Nolan Ritter. 2012. *Anwendungsbilanzen für die Endenergiesektoren in Deutschland in den Jahren 2009 und 2010*. Berlin: Arbeitsgmeiinschaft Energiebilanzen, Fraunhofer ISI, TU München, RWI. Studie beauftragt vom Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie (BMWi).

AGEB, Hans-Joachim Ziesing, Barbara Schlomann, Clemens Rohde, Wolfgang Eichhammer, Heinrich Kleeberger, Peter Tzscheutschler, Bernd Geiger, und Peter Grösche. 2011. *Anwendungsbilanzen für die Endenergiesektoren in Deutschland im Jahr 2008*. Berlin.

AGEE-Stat. 2012. *Zeitreihen zur Entwicklung Erneuerbarer Energien in Deutschland*. Arbeitsgemeinschaft Erneuerbare Energien Statistik. Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU).

AGEE-Stat. 2013. *Zeitreihen zur Entwicklung Erneuerbarer Energien in Deutschland*. Arbeitsgemeinschaft Erneuerbare Energien Statistik. Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU).

AGFW. 2011. *AGFW – Hauptbericht 2010*. Frankfurt am Main: AGFW- Der Energieeffizienzverband für Wärme, Kälte und KWK e.V.

Ajzen, Icek. 1991. „The theory of planned behavior“. *Organizational Behavior and Human Decision Processes* 50(2):179–211.

Albrecht, Tanja, und Stefan Zundel. 2010. *Gefühlte Wirtschaftlichkeit – Wie Eigenheimbesitzer energetische Sanierungsmaßnahmen ökonomisch beurteilen*. Senftenberg.

Anderson, Charles W. 1977. *Statecraft: an introduction to political choice and judgment*. Wiley.

Aydinalp-Koksal, Merih, und V. Ismet Ugursal. 2008. „Comparison of neural network, conditional demand analysis, and engineering approaches for modeling end-use energy consumption in the residential sector“. *Applied Energy* 85(4):271–296.

BAFA. 2010. „Förderdaten Marktanreizprogramm“. *Bundesamt für Wirtschaft und Ausfuhrkontrolle (BAFA).Persönliche Mitteilung; Erhalten am 18.02.2010*.

BAFA. 2012. *Beim BAFA nach dem Kraft-Wärme-Kopplungsgesetz zugelassenen KWK-Anlagen*. Bundesamt für Wirtschaft und Ausfuhrkontrolle (BAFA).

Banfi, Silvia, Mehdi Farsi, Massimo Filippini, und Martin Jakob. 2008. „Willingness to pay for energy-saving measures in residential buildings“. *Energy Economics* 30(2):503–516.

Bataille, Christopher G .F. 2005. „DESIGN AND APPLICATION OF A ENERGY-ECONOMY POLICY MODEL WITH MICRO AND MACRO ECONOMIC DYNAMICS“. Simon Fraser University.

Bauermann, Klaas, und Christoph Weber. 2011. „Energieverbrauchsreduktion im Gebäudebereich - Pfadabhängige Entwicklungen im Wärmemarkt“. in *7. Internationale Energiewirtschaftstagung an der TU Wien (IEWT)*. Wien.

Bauermann, Klaas, und Christoph Weber. 2013. „Strategien für den Wärmemarkt – Vergleich politischer Maßnahmen zur Emissionsminderung und Förderung erneuerbarer Wärme“. in *IEWT 2013, 8. Internationale Energiewirtschaftstagung an der TU Wien*. Wien, Austria.

BDH. 2010. „Jahrespressekonferenz: Trends und Herausforderungen im Wärmemarkt“. *Bundesindustrieverband Deutschland Haus-, Energie- und Umwelttechnik e.V.*

BDH. 2012. „Marktentwicklung Wärmeezeuger“. *Bundesindustrieverband Deutschland Haus-, Energie- und Umwelttechnik e.V.*

BDH. 2013. *Schornsteinfeger und Heizungsindustrie: Stagnation im Wärmemarkt verstärkt: ZIV und BDH legen neue Auswertung zum Anlagenbestand vor*. Köln.

Bemelmans-Videc, Marie-Louise, Ray C. Rist, und Evert Vedung. 1998. *Carrots, Sticks, and Sermons: Policy Instruments and Their Evaluation*. 4. Aufl. New Brunswick, New Yersey: Transaction Publishers.

Bettgenhäuser, Kjell. 2013. *Integrated assessment modelling for building stocks : a technical, economical and ecological analysis*. Bonn: Ingenieurwiss. Verl.

BGB. 2014. *Bürgerliches Gesetzbuch in der Fassung der Bekanntmachung vom 02.01.2002 (BGBl. I S. 42, ber. S. 2909, 2003 I S. 738) zuletzt geändert durch Artikel 1 Gesetz vom 22.07.2014 (BGBl. I S. 1218)*.

Biermayr, Peter. 1998. „Einflußparameter auf den Energieverbrauch der Haushalte - Eine empirisch-ökonometrische Analyse“. Technische Universität Wien. Fakultät für Elektrotechnik.

BImSchG. 2013. *Bundes-Immissionsschutzgesetz in der Fassung der Bekanntmachung vom 17. Mai 2013 (BGBl. I S. 1274), das durch Artikel 1 des Gesetzes vom 2. Juli 2013 (BGBl. I S. 1943) geändert worden ist"*.

BMF. 2013. *Bericht des Bundesministeriums der Finanzen über die Tätigkeit des EKF 2012 und über die 2013 zu erwartende Einnahmen- und Ausgabenentwicklung*.

BMU. 2007. „Richtlinien zur Förderung von Maßnahmen zur Nutzung erneuerbarer Energien im Wärmemarkt vom 5. Dezember 2007“. *Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit*.

BMU. 2011. „Richtlinien zur Förderung von Maßnahmen zur Nutzung erneuerbarer Energien im Wärmemarkt vom 11. März 2011“. *Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit*.

BMU. 2012a. „Marktanreizprogramm für Erneuerbare Energien Teil BAFA: Förderung mit Investionszuschüssen“. *Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit. Referat KI III 2*.

BMU. 2012b. „Marktanreizprogramm für Erneuerbare Energien Teil KfW: Programm Erneuerbare Energien (Premium) Jahr 2011 bis 2012“. 1–4.

BMU. 2012c. „Richtlinien zur Förderung von Maßnahmen zur Nutzung erneuerbarer Energien im Wärmemarkt vom 20. Juli 2012“. *Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit*.

BMU. 2013a. „Marktanreizprogramm für Erneuerbare Energien Teil BAFA - Jahr 2012“. *Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit, Referat E II 4*. Abgerufen September 15, 2013 (http://www.erneuerbare-energien.de/fileadmin/ee-import/erneuerbare_energien/foerderung/map/MAP__BAFA__Bilanz_2012_Stand_Januar_2013.pdf).

BMU. 2013b. „Marktanreizprogramm für Erneuerbare Energien Teil KfW: Programm Erneuerbare Energien (Premium) - Jahr 2012“. *Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit, Referat E II 4*. Abgerufen September 15, 2013 (http://www.erneuerbare-energien.de/fileadmin/ee-import/erneuerbare_energien/foerderung/map/MAP__KfW__Bilanz_2012.pdf).

BMU, und BMWI. 2011. „Energiekonzept für eine umweltschonende, zuverlässige undbezahlbare Energieversorgung“. *Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie (BMWi); Bundestministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU)* 2010(September 2010).

BMVBS. 2013. „BMVBS - Gebäudesanierung-CO2-Gebäudesanierung: Eine beeindruckende Bilanz“. Abgerufen September 17, 2013 (http://www.bmvbs.de/SharedDocs/DE/Artikel/SW/co2-gebaeudesanierung-bundesregierung-bilanz.html?nn=36226).

BMWi. 2012. „Energiedaten - nationale und internationale Entwicklung“. *Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie (BMWi)*. Abgerufen Juni 16, 2013 (http://www.bmwi.de/BMWi/Navigation/Energie/energiestatistiken.html).

BMWi. 2013. „Energieeffizient Sanieren - Ergänzungskredit“. *Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie (BMWi)*. Abgerufen September 3, 2013 (http://www.foerderdatenbank.de/Foerder-DB/Navigation/Foerderrecherche/suche.html?get=views;document&doc=11832).

Böhnisch, Helmut, und Tobias Kelm. 2007. *Evaluierung von Einzelmaßnahmen zur Nutzung erneuerbarer Energien (Marktanreizprogramm) im Zeitraum Januar bis Dezember 2006*. Stuttgart.

Böhringer, Christoph, und Thomos F. Rutherford. 2009. „Integrated assessment of energy policies: Decomposing top-down and bottom-up“. *Journal of Economic Dynamics and Control* 33(9):1648–1661.

Borgstedt, Silke, Taminia Christ, und Fritz Reusswig. 2010. *Umweltbewusstsein in Deutschland 2010 - Ergebnisse einer repräsentativen Bevölkerungsumfrage*. Heidelberg, Potsdam.

Born, Rolf, Nikolaus Diefenbach, und Tobias Loga. 2003. *Energieeinsparung durch Verbesserung des Wärmeschutzes und Modernisierung der Heizungsanlage für 31 Musterhäuser der Gebäudetypologie Inhalt*. Darmstadt.

Bousquet, F, und C Le Page. 2004. „Multi-agent simulations and ecosystem management : a review“. *Ecological Modelling* 176:313–332.

Braun, Frauke G. 2010. „Determinants of households ' space heating type : A discrete choice analysis for German households“. *Energy Policy* 38(10):5493–5503.

Breitschopf, Barbara, Marian Klobasa, Frank Sensfuß, Jan Steinbach, Ulrike Lehr, Juri Horst, Eva Hauser, Uwe Leprich, Jochen Diekmann, Frauke Braun, und Manfred Horn. 2010. *Einzel- und gesamtwirtschaftliche Analyse von Kosten- und Nutzenwirkungen des Ausbaus Erneuerbarer Energien im deutschen Strom- und Wärmemarkt [Cost and benefit effects of renewable energy expansion in the German power and heat market]*.

Breitschopf, Barbara, Jan Steinbach, Mario Ragwitz, Dorothea Hauptstock, Jochen Diekmann, Juri Horst, und Ulrike Lehr. 2011. *Methodische Ansätze zur Analyse der Kosten und Nutzenwirkungen des Ausbaus Erneuerbarer Energien im Wärmebereich [Methodological approaches for analyzing the cost and benefit effects of the expansion of renewable energy sources in the heating sector]*.

BSW-Solar. 2013. „Statistische Zahlen der deutschen Solarwärmebranche“. *Bundesverband Solarwirtschaft e. V. (BSW-Solar), Berlin*.

BT-Drs. 17/6074. 2011. „Drucksache des Deutschen Bundestages 17/6074 vom 06.06.2011:Entwurf eines Gesetzes zur steuerlichen Förderung von energetischen Sanierungsmaßnahmen an Wohngebäuden“.

Bundesregierung. 2011. „Energiewende - die einzelnen Maßnahmen im Überblick“. Abgerufen März 13, 2012

(http://www.bundesregierung.de/Content/DE/Artikel/2011/06/2011-06-06-energiewende-kabinett-weitere-informationen.html).

Bürger, V, Stefan Klinski, Ulrike Lehr, Uwe Leprich, Michael Nast, Mario Ragwitz, und Veit Bürger. 2008. „Policies to support renewable energies in the heat market“. *Energy Policy* 36(8):3150–3159.

Bürger, Veit, Felix Reitze, Max Fette, Andrea Herbst, Eberhard Jochem, Wolfgang Schulz, Dominik Seebach, und Felipe Toro. 2012. *Erarbeitung einer Integrierten Wärme- und Kältestrategie Arbeitspaket 4 - Darstellung des aktuellen Rechts- und Förderrahmens und dessen Wirkungen*. Freiburg: Fraunhofer ISE, Fraunhofer ISI, IREES, Öko-Insitut, Bremer-Energie-Institut, TU Wien. Forschungsbericht im Auftrag des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU).

Bürger, Veit, Clemens Rohde, Wolfgang Eichhammer, und Barbara Schlomann. 2012. *Energieeinsparquote für Deutschland ? Bewertung des Instruments der Energie-einsparquote (Weiße Zertifikate) auf seine Eignung als Klimaschutz- instrument für Deutschland Inhalt*. Freiburg, Karlsruhe: Öko-Institut, Fraunhofer ISI im Auftrag der KfW Bankengruppe und des WWF Deutschland.

Bürger, Veit, Dominik Seebach, Felix Reitze, Max Fette, Andrea Herbst, Eberhard Jochem, Wolfgang Schulz, und Felipe Toro. 2012. *Erarbeitung einer Integrierten Wärme- und Kältestrategie Arbeitspaket 5 –Weiterentwicklungsoptionen des Rechts- und Förderrahmens*. Freiburg, Karlsruhe, Bremen: Fraunhofer ISE, Fraunhofer ISI, IREES, Öko-Insitut, Bremer-Energie-Institut, TU Wien. Forschungsbericht im Auftrag des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU).

Bürger, Veit, Jan Steinbach, und Mario Ragwitz. 2010. „Abschätzung der Kosten einer Ausweitung der Nutzungspflicht auf bestehende öffentliche Gebäude“. *Gutachten für das Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz und Reaktorforschung; nicht veröffentlicht*.

C.A.R.M.E.N. 2013a. „Der Holzpellet-Preis-Index, Jahresmittelwerte“. Abgerufen März 21, 2013 (http://www.carmen-ev.de/infothek/preisindizes/holzpellets/jahresmittelwerte/121-der-pellet-preis-index-jahresmittelwerte).

C.A.R.M.E.N. 2013b. „Preisentwicklung bei Waldhackschnitzeln“. Abgerufen März 21, 2013 (http://www.carmen-ev.de/infothek/preisindizes/hackschnitzel/jahresmittelwerte).

Chipman, John S. 1960. „The Foundations of Utility“. *Econometrica* 28(2):193.

Claudy, Marius C., Claus Michelsen, und Aidan O’Driscoll. 2011. „The diffusion of microgeneration technologies–assessing the influence of perceived product characteristics on home owners’ willingness to pay“. *Energy Policy* 1–11.

Council of the European Union. 2008. *Energy and climate change - Elements of the final compromise*. Brussels.

Cypra, Sonja. 2009. *Auswirkung von Energieeffizienzzertifikaten auf Investitionsentscheidungen im Wohnungsbau*. Karlsruhe: KIT Scientific Publishing.

Dagsvik, John K. 1994. „Discrete and Continuous Choice, Max-Stable Processes, and Independence from Irrelevant Attributes“. *Econometrica* 62(5):1179.

Debreu, Gerard. 1960. „Review of ‚Individual Choice Behavior: A Theoretical Analysis by R. Duncan Luce‘.“ *The American Economic Review* 50(1):186 – 188.

Deforest, Nicholas, Florence Bonnet, und Michael Stadler. 2010. *Introduction to the Buildings Sector Module of SEDS*. Ernest Orlando Lawrence Berkeley National Laboratory.

Dengler, Jörg, Christoph Kost, Hans-Martin Henning, Lena Schnabel, Eberhard Jochem, Felipe Torro, Felix Reitze, und Jan Steinbach. 2011. *Erarbeitung einer Integrierten Wärme- und Kältestrategie Arbeitspaket 1 - Bestandsaufnahme und Strukturierung des Wärme- und Kältebereichs*. Freiburg, Kalrsruhe: Fraunhofer ISE, Fraunhofer ISI, IREES, Öko-Insitut, Bremer-Energie-Institut, TU Wien. Forschungsbericht im Auftrag des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU).

DEPV. 2009. „Entwicklung Pelletheizungen 2000-2009“. *Deutscher Energieholz- und Pellet-Verband e.V. (DEPV)*. Abgerufen Juli 15, 2009 (http://www.depv.de/marktdaten/pelletheizungen/).

DEPV. 2014. „Entwicklung der Pelletheizungen in Deutschland“. *Deutscher Energieholz- und Pellet-Verband e.V. (DEPV)*. Abgerufen Februar 27, 2014 (http://www.depv.de/de/home/marktdaten/entwicklung_pelletheizungen/).

Diefenbach, Nicolas, Tobias Loga, Jürgen Gabriel, und Max Fette. 2011. *Monitoring der KfW-Programme „energieeffizient Sanieren “2010 und „Ökologisch/Energieeffizient Bauen “2006–2010*. Darmstadt, Bremen.

Diefenbach, Nikolaus, und Rolf Born. 2007. „Basisdaten für Hochrechnungen mit der Deutschen Gebäudetypologie des IWU“. *Darmstadt, Institut für Wohnen und Umwelt GmbH*.

Diefenbach, Nikolaus, Holger Cischinsky, und Markus Rodenfels. 2011. *Anleitung zur Durchführung von Auswertungen mit der „Datenbasis Gebäudebestand“.* Darmstadt.

Diefenbach, Nikolaus, Holger Cischinsky, Markus Rodenfels, und Klaus-Dieter Clausnitzer. 2010. *Datenbasis Gebäudebestand - Datenerhebung zur energetischen Qualität und zu den Modernisierungstrends im deutschen Wohngebäudebestand*. Darmstadt: Institut Wohnen und Umwelt (IWU).

Diefenbach, Nikolaus, Tobias Loga, Markus Rodenfels, Jürgen Gabriel, und Max Fette. 2012. *Monitoring der KfW-Programme „Energieeffizient Sanieren“ und „Energieeffizient Bauen“ 2011*. Darmstadt, Bremen.

DIN V 18599. 2011. „Energetische Bewertung von Gebäuden - Berechnung des Nutz-, End- und Primärenergiebedarfs für Heizung, Kühlung, Lüftung, Trinkwarmwasser und Beleuchtung“. *Deutsches Institut für Normung (Hrsg.); Beuth Verlag, Berlin*.

DIN V 18599-10. 2011. „Energetische Bewertung von Gebäuden - Berechnung des Nutz-, End- und Primärenergiebedarfs für Heizung, Kühlung, Lüftung, Trinkwarmwasser und Beleuchtung – Teil 10: Nutzungsrandbedingungen, Klimadaten“. *Deutsches Institut für Normung (Hrsg.); Beuth Verlag, Berlin*.

DIN V 18599-2. 2011. „Energetische Bewertung von Gebäuden - Berechnung des Nutz-, End- und Primärenergiebedarfs für Heizung, Kühlung, Lüftung, Trinkwarmwasser und Beleuchtung – Teil 2: Nutzenergiebedarf für Heizen und Kühlen von Gebäudezonen“. *Deutsches Institut für Normung (Hrsg.); Beuth Verlag, Berlin*.

DIN V 18599-5. 2011. „Energetische Bewertung von Gebäuden - Berechnung des Nutz-, End- und Primärenergiebedarfs für Heizung, Kühlung, Lüftung, Trinkwarmwasser und Beleuchtung – Teil 5: Endenergiebedarf von Heizsystemen“. *Deutsches Institut für Normung (Hrsg.); Beuth Verlag, Berlin*.

DIN V 4108-6. 2003. „Berechnung des Jahresheizwärme- und des Jahresheizenergiebedarfs“. *Deutsches Institut für Normung (Hrsg.); Beuth Verlag, Berlin*.

DIN V 4701-10. 2003. „Energetische Bewertung heiz- und raumlufttechnischer Anlagen-Teil 10: Heizung, Trinkwassererwärmung, Lüftung“. *Deutsches Institut für Normung (Hrsg.); Beuth Verlag, Berlin*.

Dirich, Stefan, Karin Gruhler, Clemens Deilman, Ralph Petereit, Karin Petereit, Christian Kunz, André Hemple, und Dirk Markfort. 2011. *Typologie und Bestand beheizter Nichtwohngebäude in Deutschland*.

DOI/EIA. 2010. *Model Documentation Report : Residential Sector Demand Module of the National Energy Modeling System*. Washington, DC, USA.

DWD. 2012. „Historische Wetterdaten: Zeitreihen von Gebietsmitteln“.

EC. 2008. „Einstellungen der europäischen Bürger zum Klimawandel“. *Special Eurobarometer 300 / Welle 69.2 - durchgeführt von TNS Opinion & social im Auftrag Auftrag der Generaldirektion Kommunikation der Europäischen Kommission für das Europäische Parlament und die Europäische Kommision*.

EEWärmeG. 2011. *Erneuerbare-Energien-Wärmegesetz vom 7. August 2008 (BGBl. I S. 1658), das zuletzt durch Artikel 2 Absatz 68 des Gesetzes vom 22. Dezember 2011 (BGBl. I S. 3044) geändert worden ist*.

Eicke-Hennig, W. 2011. „Kleine Geschichte der Dämmstoffe, Zweiter Teil“. *Zeitschrift für Wärmeschutz, Kälteschutz, Schallschutz, Brandschutz (WKSB)* 56(66):6–34.

Elsland, Rainer, Tobias Bossmann, Ilhan Peksen, und Martin Wietschel. 2013. „Auswirkungen von Nutzerverhalten und Klimawandel auf den Heizwärmebedarf im europäischen Haushaltssektor bis 2050“. in *Proceedings of the 8. Internationale Energiewirtschaftstagung (IEWT)*. Wien, Austria.

EnergieMarktDaten. 2011. „Erdgasnetzkarte mit Marktgebieten“. Abgerufen August 15, 2011 (http://www.energiemarktdaten.de/default.aspx).

EnergieStG. 2011. *Energiesteuergesetz vom 15. Juli 2006 (BGBl. I S. 1534; 2008 I S. 660; 1007), das zuletzt durch Artikel 1 des Gesetzes vom 1. März 2011 (BGBl. I S. 282) geändert worden ist*.

EnEV. 2009. „Verordnung über energiesparenden Wärmeschutz und energiesparende Anlagentechnik bei Gebäuden“. *BGBl. Jg. 2007 Teil I Nr. 34, S. 1519* (in der Fassung vom 24. Juli 2007, geändert durch Artikel 1 der Verordnung vom 29. April 2009 (BGBl. I S. 954)).

EnEV. 2013. „Verordnung über energiesparenden Wärmeschutz und energiesparende Anlagentechnik bei Gebäuden“. *BGBl. Jg. 2007 Teil I Nr. 34, S. 1519* (in der Fassung vom 24. Juli 2007, geändert durch Artikel 2 des Gesetzes vom 18. Novemberi 2013 (BGBl. I S.3951)).

Enseling, Andreas. 2003. *Leitfaden zur Beurteilung der Wirtschaftlichkeit von Energiesparinvestitionen im Gebäudebestand*. Darmstadt.

Epstein, Joshua M., und Robert L. Axtell. 1996. *Growing artificial societies: social science from the bottom up*. Washington, D.C.; Cambridge, MA: Brookings Institution Press; MIT Press.

EStG. o. J. *Einkommensteuergesetz in der Fassung der Bekanntmachung vom 8. Oktober 2009 (BGBl. I S. 3366, 3862), das durch Artikel 3 des Gesetzes vom 2. Dezember 2014 (BGBl. I S. 1922) geändert worden ist*.

EWärmeG. 2007. *Gesetz zur Nutzung erneuerbarer Wärmeenergie in Baden-Württemberg (Erneuerbare-Wärme-Gesetz - EWärmeG) vom 20. November 2007*.

Feist, Wolfgang. 2006. „Passivhaus Wärmedämmung“. *Passivhaus Insitut, Darmstadt*. Abgerufen März 3, 2014 (http://www.passivhaustagung.de/Passivhaus_D/Passivhaus_Daemmung.html).

Ferber, Jacques. 1999. *Multi-agent systems: an introduction to distributed artificial intelligence*. Harlow: Addison-Wesley.

Fishbein, Martin, und Icek Ajzen. 1975. *Belief, attitude, intention and behavior: An introduction to theory and research*. Addison-Wesley Pub (Sd).

Galarraga, Ibon, Mikel González-Eguino, und Anil Markandya. 2011. *Handbook of sustainable energy*. Northampton: Edward Elgar Publishing.

Gamtessa, Samuel. 2006. „An Overview of the Buildings Module of the Canadian Integrated Modelling System (CIMS)“.

Genoese, Massimo. 2010. *Energiewirtschaftliche Analysen des deutschen Strommarkts mit agentenbasierter Simulation / Massimo Genoese*. 1. Aufl. Baden-Baden: Nomos.

Gigerenzer, G. 2008. „Why Heuristics Work“. *Perspectives on Psychological Science* 3(1):20–29.

Gigerenzer, Gerd. 1999. *Simple heuristics that make us smart*. Oxford: Oxford University Press.

Gigerenzer, Gerd, und Reinhard Selten. 2001. „Bounded rationality: the adaptive toolbox“. MIT Press.

Gigerenzer, Gerd, und Peter M. Todd. 1999. „Fast and frugal heuristics: The adaptive toolbox“. S. 3–34 in, *Evolution and cognition.* New York, NY, US: Oxford University Press.

Gil-moltó, María José, und Arne Risa Hole. 2003. *Tests for the consistency of three-level nested logit models with utility maximization*. St. Andrews, Scotland.

Giraudet, Louis-Gaëtan, Céline Guivarch, und Philippe Quirion. 2012. „Exploring the potential for energy conservation in French households through hybrid modeling“. *Energy Economics* 34(2):426–445.

Goldstein, Daniel G., und Gerd Gigerenzer. 1999. „The recognition heuristic: How ignorance makes us smart“. S. 37–58 in, *Evolution and cognition.* New York, NY, US: Oxford University Press.

Götze, Uwe. 2008. *Investitionsrechnung: Modelle und Analysen zur Beurteilung von Investitionsvorhaben*. Springer-Verlag.

Hare, M, und P Deadman. 2004. „Further towards a taxonomy of agent-based simulation models in environmental management“. *Mathematics and Computers in Simulation* 64:25–40.

Held, Anne. 2010. *Modelling the future development of renewable energy technologies in the European electricity sector using agent-based simulation*. Stuttgart: Fraunhofer Verlag.

Henkel, Johannes. 2012. „Modelling the Diffusion of Innovative Heating Systems in Germany - Decision Criteria , Influence of Policy Instruments and Vintage Path Dependencies“. Universität Berlin.

Hinz, Eberhard. 2011. *Untersuchung zur weiteren Verschärfung der energetischen Anforderungen an Wohngebäude mit der EnEV 2012 - Kosten energierelevanter Bau- und Anlagenteile bei der energetischen Modernisierung von Altbauten*. Darmstadt: Institut für Wohnen und Umwelt (IWU) im Auftrag des Bundesinstituts für Bau-, Stadt- und Raumforschung (BBSR).

Huston, Michael, Donald DeAngelis, und Wilfred Post. 1988. „New Computer Models Unify Ecological Theory“. *BioScience* 38(10):682–691.

INAS. 2013. „Globales Emissions-Modell Integrierter Systeme (GEMIS) Version 4.81“. *Internationales Institut für Nachhaltigkeitsanalysen und Strategien*.

IWU. 2003. „Deutsche Gebäudetypologie -Dokumentation“. *Institut für Wohnen und Umwelt, Darmstadt*.

Jackson, Tim. 2005. *Motivating sustainable consumption - a review of evidence on consumer behaviour and behavioural change*. Surrey, UK.

Jager, Wander. 2000. „Modelling consumer behaviour“. Rijksuniversiteit Groningen.

Jochum, Rainer. 2001. *Zur stoffstromorientierten Investitionsplanung im Rahmen integrierter Emissionsminderungskonzepte*. Düsseldorf: VDI-Verlag.

Kaiser, Florian G., Gundula Hubner, und Franz X. Bogner. 2005. „Contrasting the theory of planned behavior with the value-belief-norm model in explaining conservation behavior“. *Journal of Applied Social Psychology* 35(10):2150–2170.

Kavgic, M., a. Mavrogianni, D. Mumovic, a. Summerfield, Z. Stevanovic, und M. Djurovic-Petrovic. 2010. „A review of bottom-up building stock models for energy consumption in the residential sector“. *Building and Environment* 45(7):1683–1697.

Kelm, Tobias, Michael Nast, Sebastian Kilburg, und Dirk Mangold. 2008. *Evaluierung von Einzelmaßnahmen zur Nutzung erneuerbarer Energien (Marktanreizprogramm) im Zeitraum Januar 2007 bis Dezember 2008 Kurzbericht für den Zeitraum Januar bis Mai 2008 Projektbearbeitung*. Stuttgart.

Kern, Werner. 1974. *Investitionsrechnung*. Stuttgart: Poeschel.

KfW. 2013a. „Anlage zu den Merkblättern Energieeffizient Sanieren: Kredit (151/152), Investionszuschuss (430) - Technische Mindesanforderungen“. *Kreditanstalt für Wiederaufbau (KfW)* 5399002(430):1–12. Abgerufen (https://www.kfw.de/media/pdf/download_center/foerderprogramme__inlandsfoerderung_/pdf_dokumente_2/59591.pdf).

KfW. 2013b. „Energieeffizient Sanieren - Programm 151, 152 und 430“. *Kreditanstalt für Wiederaufbau (KfW)*. Abgerufen September 3, 2013 (https://www.kfw.de/inlandsfoerderung/Privatpersonen/Bestandsimmobilie/Energieeffizient-Sanieren/Förderratgeber).

Klinski, Stefan, Veit Bürger, Andreas Hermann, Friedhelm Keimeyer, und Christoph Brunn. 2013. *Konzepte für die Beseitigung rechtlicher Hemmnisse des Klimaschutzes im Gebäudebereich*. Dessau-Roßlau: Umweltbundesamt (UBA).

Konstantin, Panos. 2009. *Praxisbuch Energiewirtschaft*. 2. Aufl. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg.

Kranzl, Lukas, Max Fette, Andrea Herbst, Marcus Hummel, Eberhard Jochem, Judit Kockat, Ilja Lifschiz, Andreas Müller, Felix Reitze, Wolfgang Schulz, Jan Steinbach, und Felipe Toro. 2012. *Erarbeitung einer Integrierten Wärme- und Kältestrategie Arbeitspaket 6 - Integrale Modellierung auf Basis vorhandener sektoraler Modelle und Erstellen eines integrierten Rechenmodells des Wärme- und Kältebereichs*. Wien, Karlsruhe, Bremen: Fraunhofer ISE, Fraunhofer ISI, IREES, Öko-Insitut, Bremer-Energie-Institut, TU Wien. Forschungsbericht im Auftrag des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU).

Kranzl, Lukas, Marcus Hummel, Andreas Müller, und Jan Steinbach. 2013. „Renewable heating: perspectives and the impact of policy instruments“. *Energy Policy* 59:44–58.

Kremer, Zsolt. 2005. „Abbau von Hemmnissen bei der energetischen Sanierung des Gebäudebestandes“. *Forschungsbericht gefördert durch das Bundesamt für Bauwesen und Raumordnung*.

Kruschwitz, Lutz. 2011. *Investitionsrechnung*. Oldenbourg Verlag.

Langiß, Ole, Astrid Aretz, Helmut Böhnisch, Edelgard Gruber, Wilhelm Mannsbart, und Mario Ragwitz. 2004. *Evaluierung von Einzelmaßnahmen zur Nutzung erneuerbarer Energien (Marktanreizprogramm) im Zeitraum Januar 2002 bis August 2004*. Stuttgart, Karlsruhe.

Langniß, Ole, Helmut Böhnisch, Alexander Buschmann, Frank Musiol, Hans Hartmann, Klaus Reisinger, und Thomas Pauschinger. 2006. *Evaluierung von Einzelmaßnahmen zur Nutzung erneuerbarer Energien (Marktanreizprogramm) im Zeitraum Januar 2004 bis Dezember 2005*. Stuttgart, Straubing.

Langniß, Ole, Tjark Kohberg, Hans-Friedrich Wülbeck, Michael Nast, Martin Pehnt, Stephanie Frick, Harald Drück, und Elke Streicher. 2011. *Evaluierung des Marktanreizprogramms für erneuerbare Energien : Ergebnisse der Förderung für das Jahr 2010*. Stuttgart.

Lawless, Jerald F. 2003. *Statistical models and methods for lifetime data*. Hoboken, N.J.: Wiley-Interscience.

Loga, Tobias. 1999. *Räumlich und zeitlich eingeschränkte Beheizung Korrekturfaktoren zur Berücksichtigung in stationären Energiebilanzverfahren*. Darmstadt: Institut Wohnen und Umwelt (IWU).

Loga, Tobias, Marc Großklos, und Jens Knissel. 2003. *Der Einfluss des Gebäudestandards und des Nutzerverhaltens auf die Heizkosten*. Darmstadt.

Löschel, Andreas, Georg Erdmann, Frithjof Staiß, und Hans-joachim Ziesing. 2014. *Stellungnahme zum zweiten Monitoring-Bericht der Bundesregierung für das Berichtsjahr 2012*. Stuttgart, Berlin Mannheim.

Makhorin, Andrew. 2013. „GNU Linear Programming Kit (GLPK) for Windows".

Manson, Steve M. 2001. „Calibration, Verification, And Validation". S. 42–47 in *Meeting the Challenge of Complexity: Proceedings of a Special Workshop on Land-Use/ Land-Cover Change*, herausgegeben von Dawn C. Parker, Thomas Berger, Steve M. Manson, und William J. McConnell. Irvine, California: Center for Spatially Integrated Social Science, University of California at Santa Barbara.

MAP Förderrichtlinie. 2002. „Richtlinien zur Förderung von Maßnahmen zur Nutzung erneuerbarer Energien vom 15. März 2002". *Bundesanzeiger Nr. 58, S. 5877* (ausgegeben am 23. März 2002).

Markewitz, Peter, und Gotthard Stein. 2003. *Das IKARUS-Projekt : Energietechnische Perspektiven für Deutschland: Abschlussbericht des Projektes Ikarus*. herausgegeben von Forschungszentrum Jülich. Jülich: Schriften des Forschungszentrums Jülich Reihe Umwelt/Environment. Band/ Volume 39.

Marschak, Jacob. 1960. „Binary Choice Constraints on Random Utility Indicators". in *Mathematical Methods in the social science 1959: Proceedings of the first Stanford Symposium*, herausgegeben von J. Arrow Kenneth, Samuel Karlin, und Patrick Suppes. Stanford, California: Stanford University Press.

McFadden, Daniel. 1978. „Modelling the choice of residential location". S. 75–96 in *SPATIAL INTERACTION THEORY AND PLANNING MODELS*, herausgegeben von A. Karlqvist, L. Lundqvist, F. Snickars, und J. Weibull. Amsterdam.

McKenna, Russell, Erik Merkel, Daniel Fehrenbach, Stephanie Mehne, und Wolf Fichtner. 2013. „Energy efficiency in the German residential sector: A bottom-up building-stock-model-based analysis in the context of energy-political targets". *Building and Environment* 62:77–88.

Meyer, Paul, Max Büchler, Kurt Christen, und Andreas Waibel. 1994. *Alterungsverhalten von Bauteilen und Unterhaltskosten. Grundlagen für den Unterhalt und die Erneuerung von Wohnbauten*. Bern, Schweiz.

Michelsen, Carl Christian, und Reinhard Madlener. 2010. „Integrated Theoretical Framework for a Homeowner ' s Decision in Favor of an Innovative Residential Heating System Carl Christian Michelsen and Reinhard Madlener February 2010 Institute for Future Energy Consumer Needs and Behavior (FCN) Faculty of Busi". (2).

Michelsen, Carl Christian, und Reinhard Madlener. 2012. „Homeowners' preferences for adopting innovative residential heating systems: A discrete choice analysis for Germany". *Energy Economics* 34(5):1271–1283.

Mindline Energy. 2009. *Entscheidungskriterien beim Kauf und bei der Auswahl von Heizsystemen*. Ergebnisse einer repräsentativen Umfrage im Auftrag von Korehnke Kommunikation.

Moore, Gary C., und Izak Benbasat. 1996. „Integrating diffusion of innovations and theory of reasoned action models to predict utilization of information technology by end-users". *Diffusion and adoption of information technology* 132–146.

Mügge, Günter. 1993. *Die Bandbreite des Heizenergieverbrauchs: Analyse theoretischer Einflußgrößen und praktischer Verbrauchsmessungen*. VDI-Verlag.

Müller, Andreas. 2012. *Working paper Stochastic buildings simulation*. Vienna, Austria.

Müller, Andreas, und Peter Biermayr. 2011. „Die Zukunft des Wärmebedarfs für Heizung und Brauchwassererwärmung in österreichischen Gebäuden bis 2050". S. 1–17 in *7. Internationale Energiewirtschaftstagung an der TU Wien IEWT*. Wien: Energy Economics Group, Vienna University of Technology.

Müller, Andreas, Peter Biermayr, Lukas Kranzl, Reinhard Haas, Florian Altenburger, Irene Bergmann, Günther Friedl, Walter Haslinger, Richard Heimrath, Ralf Ohnmacht, und Werner Weiss. 2010. *Heizen 2050: Systeme zur Wärmebereitstellung und Raumklimatisierung im Österreichischen Gebäudebestand: Technologische Anforderungen bis zum Jahr 2050*. Wien: Forschungsprojekt gefördert durch den Klima- und Energiefonds.

Mundaca, Luis, Lena Neij, Ernst Worell, und Michael McNeil. 2010. „Evaluating energy efficiency policies with energy-economy models". *Annual Review of Environment and Resources*.

Nast, Michael, Veit Bürger, Stefan Klinski, Uwe Leprich, und Mario Ragwitz. 2006. „Eckpunkte für die Entwicklung und Einführung budgetunabhängiger Instrumente zur Marktdurchdringung erneuerbarer Energien im Wärmemarkt",. *Ausarbeitung im Auftrag des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit*.

Natarajan, Sukumar, und Geoffrey J. Levermore. 2007. „Predicting future UK housing stock and carbon emissions". *Energy Policy* 35(11):5719–5727.

Natarajan, Sukumar, Julian Padget, und Liam Elliott. 2011. „Modelling UK domestic energy and carbon emissions: an agent-based approach". *Energy and Buildings* 43(10):2602–2612.

Nitsch, Joachim. 2007. „Leitstudie 2007 ‚Ausbaustrategie Erneuerbare Energien' - Aktualisierung und Neubewertung bis zu den Jahren 2020 und 2030 mit Ausblick

bis 2050“. *Studie im Auftrag des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit*.

Nitsch, Joachim, Thomas Pregger, Tobias Naegler, Michael Sterner, Normen Gerhardt, Carsten Pape, Yves-Marie Saint-Drenan, und Bernd Wenzel. 2012. „Langfristszenarien und Strategien für den Ausbau der erneuerbaren Energien in Deutschland bei Berücksichtigung der Entwicklung in Europa und global“. *Stuttgart/ Kassel/ Teltow: DLR, Fhg-IWES, IFNE im Auftrag des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit*.

Olonscheck, Mady, Anne Holsten, und Jürgen P. Kropp. 2011. „Heating and cooling energy demand and related emissions of the German residential building stock under climate change“. *Energy Policy* 39(9):4795–4806.

Pape, Ulrich. 2011. *Grundlagen der Finanzierung und Investition: Mit Fallbeispielen und Übungen*. Oldenbourg Verlag.

Parekh, Anil. 2005. „DEVELOPMENT OF ARCHETYPES OF BUILDING CHARACTERISTCS LIBRARIES FOR SIMPLIFIED ENERGY USE EVALAUTION OF HOUSES Anil Parekh , M . A . Sc ., P . Eng . Senior Researcher , Sustainable Buildings and Communities CANMET Energy Technology Centre Natural Resources“. 921–928.

Parti, Michael, und Cynthia Parti. 1980. „The Total and Appliance-Specific Conditional Demand for Electricity in the Household Sector“. *The Bell Journal of Economics* 11(1):309–321.

Pech, Anton, Christian Pöhn, Franz Kalwoda, und Norbert Kleeber. 2004. *Bauphysik*. Wien: Springer.

R Development Core Team. 2013. „A language and environment for statistical computing“.

Recknagel, Hermann, Eberhard Sprenger, und Ernst-Rudolf Schramek. 2002. *Taschenbuch für Heizung und Klimatechnik: einschließlich Warmwasser- und Kältetechnik 01/02*. München: Oldenbourg.

Rivers, N, und M Jaccard. 2006. „Useful models for simulating policies to induce technological change“. *Energy Policy* 34(15):2038–2047.

Rivers, Nic, und Mark Jaccard. 2005. „Combining top-down and bottom-up approaches to energy-economy modeling using discrete choice methods“. *The Energy Journal* 83–106.

RL 2009/28/EG. 2009. „Richtline 2009/28/EG vom 23. April 2009 des Europäischen Parlaments und des Rates zur Förderung der Nutzung von Energie aus erneuerbaren Quellen und zur Änderung und anschließenden Aufhebung der Richtlinien 2001/77/EG und 2003/30/EG“. *AblEU Nr. L 140/16 v. 5.6.2009*.

RL 2010/31/EU. 2010. „Richtline 2010/31/EU vom 19. Mai 2010 des Europäischen Parlaments und des Rates über die Gesamtenergieeffizienz von Gebäuden (Neufassung)“. *AblEU Nr. L 153/13 v. 18.6.2010*.

RL 2012/27/EU. 2012. „Richtlinie 2012/27/EU des Europäischen Parlaments und des Rates vom 25. Oktober 2012 zur Energieeffizienz, zur Änderung der Richtlinien 2009/125/EG und 2010/30/EU und zur Aufhebung der Richtlinien 2004/8/EG und 2006/32/EG“. *AblEU Nr. L 315/1 v. 14.11.2012*.

Rogers, Everett M. 2003. *Diffusion of Innovations, 5th Edition*. Original. Free Press.

Rouvinen, S., und J. Matero. 2012. „Stated preferences of Finnish private homeowners for residential heating systems: A discrete choice experiment“. *Biomass and Bioenergy* 1–11.

Sandia National Laboratories. 2013. „Coopr Pyomo - The Python Optimization Modeling Objects package“.

Scarpa, Riccardo, und Ken Willis. 2010. „Willingness-to-pay for renewable energy: Primary and discretionary choice of British households’ for micro-generation technologies“. *Energy Economics* 32(1):129–136.

Schätzl, Ludwig, Holger Oertel, Juliande Banse, Winfried Killisch, Steffen Jentsch, Jan Glatter, und Kris Kaufmann. 2007. *Investitionsprozesse im Wohnungsbestand - unter besonderer Berücksichtigung privater Vermieter*.

Schlesinger, Michael, Dietmar Lindenberger, und Christian Lutz. 2010. „Energieszenarien für eine Energiekonzept der Bundesregierung“. *Studie im Auftrag des Bundesministeriums für Wirtschaft und Technologie*.

Schlomann, Barbara, Elisabeth Dütschke, Michaela Gilgi, Jan Steinbach, Heinrich Kleeberger, Bernd Geiger, Edelgard Gruber, Michael Mai, Andreas Gerspacher, und Werner Schiller. 2011. *Energieverbrauch des Sektors Gewerbe, Handel, Dienstleistungen (GHD) in Deutschland für die Jahre 2007 bis 2010*. Karlsruhe, München, Nürnberg.

Schlomann, Barbara, Wolfgang Eichhammer, Clemens Rohde, Judit Kockat, Daniel Becker, und Veit Bürger. 2012. *Kosten-/Nutzen-Analyse der Einführung marktorientierter Instrumente zur Realisierung von Endenergieeinsparungen in Deutschland*. Kalrsruhe, Freiburg, Berlin.

Schlomann, Barbara, Jan Steinbach, Heinrich Kleeberger, Bernd Geiger, Antje Pich, Edelgard Gruber, Michael Mai, und Andreas Gerspacher. 2013. *Energieverbrauch des Sektors Gewerbe, Handel, Dienstleistungen (GHD) in Deutschland für die Jahre 2007 bis 2010*. Karlsruhe, München, Nürnberg.

Schriefl, Ernst. 2007. „Modellierung der Entwicklung von Treibhausgasemissionen und Energieverbrauch für Raumwärme und Warmwasser im österreichischen Wohngebäudebestand unter der Annahme verschiedener Optimierungsziele“.

Wien: Technische Universität Wien. Fakultät für Elektrotechnik und Informationstechnik.

Schultmann, Frank. 1998. *Kreislaufführung von Baustoffen : stoffflußbasiertes Projektmanagement für die operative Demontage- und Recyclingplanung von Gebäuden*. Berlin: Erich Schmidt Verlag.

Schultmann, Frank, Rainer Jochum, und Otto Rentz. 2002. „Stoffstrombasierte Investitionsplanung zur Bewertung betrieblicher Emissionsminderungsmaßnahmen“. *Zeitschrift für Planung* 13:1–26.

Schultz, Wolfgang, Max Fette, Farikha Idrissova, Eberhard Jochem, Christoph Kost, Felix Reitze, Jan Steinbach, und Felipe Torro. 2011. *Erarbeitung einer Integrierten Wärme- und Kältestrategie Arbeitspaket 2 - Bestandsaufnahme und Strukturierung der Akteure des Wärme- und Kältemarktes*. Freiburg, Karlsruhe, Bremen: Fraunhofer ISE, Fraunhofer ISI, IREES, Öko-Insitut, Bremer-Energie-Institut, TU Wien. Forschungsbericht im Auftrag des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU).

Seefeldt, Friedrich, Jutta Struwe, Mario Ragwitz, Jan Steinbach, Ulf Jacobshagen, Markus Kachel, Edmund Brandt, Michael Nast, Sonja Simon, und Veit Bürger. 2011. *Fachliche und juristische Konzeption eines haushaltsunabhängigen Instruments für erneuerbare Wärme*. Berlin, Karlsruhe, Braunschweig, Stuttgart, Freiburg.

Sensfuß, Frank. 2007. „Assessment of the impact of renewable electricity generation on the German electricity sector - An agent-based simulation approach“. Universität Karlsruhe (TH).

Simon, Herbert A. 1957. *Models of man: social and rational; mathematical essays on rational human behavior in society setting.* New York: Wiley.

Sinus Institut. 2014. „Die Sinus-Milieus in Deutschland“. Abgerufen April 1, 2014 (http://www.sinus-institut.de/loesungen/sinus-milieus.html).

Sopha, Bertha Maya. 2011. „Agent-Based Modeling and Simulation of Clean Heating System Adoption in Norway“. Norwegian University of Science and Technology.

Sopha, Bertha Maya, und Christian a. Klöckner. 2011. „Psychological factors in the diffusion of sustainable technology: A study of Norwegian households’ adoption of wood pellet heating“. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 15(6):2756–2765.

Sopha, Bertha Maya, Christian A. Klöckner, und Edgar G. Hertwich. 2011. „Exploring policy options for a transition to sustainable heating system diffusion using an agent-based simulation“. *Energy Policy* 39(5):2722–2729.

StaBuA. 2011. „Baufertigstellungen und Baugenehmigungen aus Bautätigkeit und Wohnen - Bautätigkeit 2010“. *Statistisches Bundesamt. Wiesbaden* Fachserie .

StaBuA. 2012. „Temperaturbereinigung bei der Umweltökonomischen Gesamtrechnung“.

StaBuA. 2013a. *Bautätigkeit und Wohnungen Fachserie 5 Reihe 1*. Wiesbaden.

StaBuA. 2013b. *Datenhandbuch zum Mikrozensus Scientific Use File 2010*. Wiesbaden, Mannheim.

StaBuA. 2013c. „Umweltnutzung und Wirtschaft. Tabellen zu den Umweltökonomischen Gesamtrechnungen Teil 2: Energie“. *Statistisches Bundesamt, Wiesbaden*.

StaBuA. 2013d. *Wohngebäude- und Wohnungsbestand - Stichtag 31.12.2010, regionale Tiefe: Gemeinden, Samt-/Verbandsgemeinden*.

StaBuA. 2013e. „Zensus 2011 - Gebäude und Wohnungen“. *Statistisches Bundesamt, Wiesbaden. Ergebnisse zum Stand Mai 2013*.

Stadler, M., L. Kranzl, C. Huber, R. Haas, und E. Tsioliaridou. 2007. „Policy strategies and paths to promote sustainable energy systems—The dynamic Invert simulation tool“. *Energy policy* 35(1).

Steinbach, Jan. 2013a. „Akteursspezifische Untersuchung von Strategien zur Steigerung der Energieeffizienz und zum Ausbau erneuerbarer Energien im Wohngebäudebereich“. S. 48–50 in *Proceedings of the IEWT (8. Internationale Energiewirtschaftstagung)*. Wien.

Steinbach, Jan. 2013b. „Internal working paper: literature review of integrating user and investment behaviour in bottom-up simulation models“. *Deliverable 4.1 of the IEE project Entranze* (June).

Steinbach, Jan, Andrea Herbst, Lukas Kranzl, Marcus Hummel, Felipe Toro, Felix Reitze, Eberhard Jochem, und Wolfgang Schulz. 2013. „Scenario based evaluation of policies addressing the German heating and cooling sector : A bottom-up modeling approach integrating buildings , industry and district heating“. in *Proceedings of ECEEE Summer Study 2013*.

Steinbach, Jan, Judit Kockat, und Lukas Kranzl. 2012. *Erarbeitung einer Integrierten Wärme- und Kältestrategie Arbeitspaket 7 - Szenarienberechnungen, Policy Evaluation und Sensitivitätsanalysen*. Karlsruhe, Wien: Fraunhofer ISE, Fraunhofer ISI, IREES, Öko-Insitut, Bremer-Energie-Institut, TU Wien. Forschungsbericht im Auftrag des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU).

Steinbach, Jan, Mario Ragwitz, Veit Bürger, Liv Becker, Lukas Kranzl, Marcus Hummel, und Andreas Müller. 2013. „Analysis of harmonisation options for renewable heating support policies in the European Union“. *Energy Policy* 59:59–70.

Steinbach, Jan, Friedrich Seefeldt, Edmund Brandt, Veit Bürger, Ulf Jacobshagen, Markus Kachel, Michael Nast, und Mario Ragwitz. 2013. „State Budget Independent, Market-Based Instruments to Finance Renewable Heat Strategies“. *Energy & Environment* 1 - 2.

Stengel, Julian. 2014. *Akteursbasierte Simulation der energetischen Modernisierung des Wohngebäudebestands in Deutschland*. Karlsruhe: KIT Scientific Publishing, Produktion und Energie Band 6.

Stern, Paul C, Thomas Dietz, Troy Abel, Gregory A Guagnano, und Linda Kalof. 1999. „A Value-Belief-Norm Theory of Support for Social Movements : The Case of Environmentalism“. *Human Ecology Review* 6(2):81–97.

Stieß, Immanuel, Victoria van der Land, Babara Birzle-Harder, und Jutta Deffner. 2010. *Handlungsmotive, -hemmnisse und Zielgruppen für eine energetische Gebäudesanierung - Ergebnisse einer standardisierten Befragung von Eigenheimsanierern*. Frankfurt am Main.

Suganthi, L., und Anand a. Samuel. 2012. „Energy models for demand forecasting—A review“. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 16(2):1223–1240.

Swan, Lukas G., und V. Ismet Ugursal. 2009. „Modeling of end-use energy consumption in the residential sector: A review of modeling techniques“. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 13:1819–1835.

TFZ. 2009. „Entwicklung Scheitholzpreise“. *Technologie- und Förderzentrum im Kompetenzzentrum für Nachwachsende Rohstoffe, Straubing. Persönliche Mitteilung; erhalten am 06.07.2009*.

TFZ. 2011. „Aktuelle Scheitholzpreise“. *Technologie- und Förderzentrum im Kompetenzzentrum für Nachwachsende Rohstoffe, Straubing*. Abgerufen September 19, 2011 (http://www.tfz.bayern.de/festbrennstoffe/17385/).

TFZ. 2013. „Aktuelle Scheitholzpreise“. *Technologie- und Förderzentrum im Kompetenzzentrum für Nachwachsende Rohstoffe, Straubing*. Abgerufen März 21, 2013 (http://www.tfz.bayern.de/festbrennstoffe/17385/).

Thurstone, Ll. 1927. „A Law of Comparative Judgment“. *Psychological Review* 34:273.

Train, Kenneth E. 2003. *Discrete Choice Methods with Simulation*. Cambridge: Cambridge University Press.

UBA. 2011. *Berichterstattung unter der Klimarahmenkonvention der Vereinten Nationen und dem Kyoto-Protokoll 2011 -Nationaler Inventarbericht zum Deutschen Treibhausgasinventar 1990 - 2009*. Dessau-Roßlau: Umweltbundesamt (UBA).

VDI 2067-1. 2000. *VDI Richtlinie: Wirtschaftlichkeit gebäudetechnischer Anlagen - Grundlagen und Kostenberechnung*. Berlin: Beuth Verlag.

Vedung, Evert. 1998. „Policy Instruments: Typologies and Theories“. S. 21 – 58 in *Carrots, Sticks, and Sermons: Policy Instruments and Their Evaluation*, herausgegeben von Marie-Louise Bemelmans-Videc, Ray C. Rist, und Evert Vedung. New Brunswick, New Yersey: Transaction Publishers.

Verhoef, Peter C., und Philip Hans Franses. 2002. *On combining revealed and stated preferences to forecast customer behaviour: three case studies*. Rotterdam, The Netherlands.

Wietschel, Martin, Marlene Arens, Christian Dötsch, Sebastian Herkel, Wolfram Krewitt, Peter Markewitz, Dominik Möst, und Martin Scheufen. 2010. *Energietechnologien 2050 - Schwerpunkte für Forschung und Entwicklung: Technologienbericht.* Stuttgart: Fraunhofer Verlag.

Wilson, Charlie, und Hadi Dowlatabadi. 2007. „Models of Decision Making and Residential Energy Use“. *Annual Review of Environment and Resources* 32(1):169–203.

Wittmann, Tobias. 2008. *Agent-based models of energy investment decisions*. Heidelberg: Physica-Verlag.

WoEigG. 2014. *Wohnungseigentumsgesetz in der im Bundesgesetzblatt Teil III, Gliederungsnummer 403-1, veröffentlichten bereinigten Fassung, das zuletzt durch Artikel 4 des Gesetzes vom 5. Dezember 2014 (BGBl. I S. 1962) geändert worden ist*.

Wooldridge, M, und NR Jennings. 1995. „Intelligent agents: Theory and practice“. *Knowledge engineering Rev.* 115–152.

Wooldridge, Michael. 2013. „Intelligent Agents“. S. 3 – 50 in *Multiagent Systems*, herausgegeben von G. Weiss. Cambridge, MA: MIT Press.

Wüest, Hannes. 1994. *Basisdaten und Perspektiven zur Entwicklung des Gebäudeparks 1990-2030: Arbeitsbericht 30. August 1994*. Bern: Wüest & Partner.

Zhao, Hai-xiang, und Frédéric Magoulès. 2012. „A review on the prediction of building energy consumption“. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 16(6):3586–3592.

ZSW. 2012. „Persönliche Mitteilung: Expertengepräch mit AGEE-Stat (ZSW) und Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit am 08.05.2012“. *Zentrum für Sonnenenergie- und Wasserstoff-Forschung Baden-Württemberg (ZSW)*.

Der Wärmebedarf in Gebäuden hat mit rund 30% Anteil am gesamten Energiebedarf eine hohe Relevanz für eine nachhaltige Transformation des Energiesystems. In dieser Arbeit wird die Wirkung unterschiedlicher Politikinstrumente zur Förderung erneuerbarer Energien und Energieeffizienz untersucht. Dazu wird ein Energiesystemmodell entwickelt, welches sowohl eine detaillierte technische Abbildung des Gebäudesektors als auch die Simulation relevanter Akteure und dessen Investitionsentscheidungen ermöglicht.

ISBN 978-3-8396-0987-3
9 783839 609873