

**Simulationsbasierte Analyse zielführender ökonomischer
Rahmenbedingungen bei der Transformation zum nahezu
klimaneutralen Wohngebäudebestand in 2045/2050**

**vom Fachbereich Bauingenieurwesen der RPTU Kaiserslautern-Landau
zur Verleihung des akademischen Grades Doktor-Ingenieur (Dr.-Ing.)
genehmigte Dissertation**

vorgelegt von:

Dennis Aldenhoff, M.Sc.

Dekan: Prof. Dr.-Ing. Karsten Körkemeyer

Prüfungskommission

Tag der mündlichen Prüfung: 20.12.2023

Vorsitzender: Prof. Dr.-Ing. Matthias Pahn

1.Berichterstatter: Prof. Dr. Björn-Martin Kurzrock

2.Berichterstatter: Prof. Dr.-Ing. Sabine Hoffmann

Kaiserslautern 2024

(DE-386)

Kurzfassung

In 2022 verfehlten Gebäude- und Verkehrssektor die Klimaschutzziele in Deutschland. Im Gegensatz zum Verkehrssektor stehen im Gebäudesektor lange Lebensdauern schnellen Technologiewechseln entgegen, weshalb Strategien besonders frühzeitig umgesetzt werden müssen. Zudem ist der Gebäudebestand durch hohe Investitionskosten bei vergleichsweise geringen Treibhausgasersparungen je investiertem Euro geprägt. In Kombination erschweren diese Hemmnisse die Erreichung der Klimaschutzziele für den Wohngebäudebestand deutlich.

Ziel dieser Arbeit ist die Entwicklung eines Wohngebäudebestandsmodells, um Transformationspfade unter dem Einfluss variierender ökonomischer Rahmenbedingungen, wie z.B. dem Einfluss unterschiedlicher CO_2 -Preisverläufe und eine Reinvestition der CO_2 -Steuer in die Modernisierung der Gebäude, simulieren und analysieren zu können.

Im ersten Schritt wird ein Wohngebäudebestandsmodell bei Fortschreibung der ökonomischen Rahmenbedingungen im Startjahr entwickelt und angewendet. Hierzu werden wichtige Parameter des Gebäudebestands identifiziert und diese anhand des vergangenen Verlaufs analysiert sowie Szenarien und Prognosen betrachtet. Ergebnis sind Ausgangsbedingungen und Einflussfaktoren auf den weiteren Verlauf, die für die Modellierung genutzt werden. Im zweiten Schritt wird eine Systematik entwickelt, um Modernisierungsraten endogen bei Variation der ökonomischen Rahmenbedingungen berechnen zu können.

In der vorliegenden Arbeit wird ein Modell vorgestellt, dass die ökonomischen Rahmenbedingungen und das Kopplungsprinzip¹ dynamisch bei der Simulation von Vollmodernisierungsraten berücksichtigt. Die Ergebnisse zeigen, dass Vollmodernisierungsraten von 2%/a über längere Zeiträume extreme Rahmenbedingungen benötigen und unrealistisch sind. Haupthemmnisse sind der Sanierungsbedarf (Kopplungsprinzip), sinkende Energieeinsparpotenziale der jüngeren Baualtersklassen und Mitnahmeeffekte bei verbesserter Förderung. Da eine Erreichung der Klimaschutzziele nur durch Anpassung der CO_2 -Steuer (auch bei Reinvestition) nicht innerhalb realistischer Steuerhöhen im Modell möglich ist, wird stattdessen ein Maßnahmenpaket aus wirtschaftlichen und legislativen Rahmenbedingungen zur Zielerreichung vorgestellt.

¹Nach dem Kopplungsprinzip sollte eine energetische Modernisierung an eine Sanierung gekoppelt werden, da ansonsten eine wirtschaftliche Durchführung in der Regel nicht möglich ist. Hierzu wird vielfach zwischen energiebedingten Mehrkosten und „Sowieso-Kosten“ unterschieden.

Abstract

In 2022, the building and transport sectors missed the climate protection targets in Germany. In contrast to the transport sector, rapid technology changes are not to be expected in the building sector due to long lifetimes, which is why strategies need to be implemented particularly early on. In addition, the building stock is characterised by high investment costs with comparatively low greenhouse gas savings per euro invested. In combination, these obstacles make it significantly more difficult to achieve the climate protection targets for the residential building stock.

The aim of this work is to develop a residential building stock model in order to simulate and analyse transformation paths influenced by varying economic conditions, such as the influence of different CO_2 price trends and a reinvestment of the CO_2 tax in the modernisation of buildings.

In the first step, a residential building stock model is developed and applied by updating the economic framework conditions in the starting year. For this purpose, important parameters of the building stock are identified, these are analysed on the basis of the past course and estimates of the future course are considered on the basis of published forecasts and scenarios. The results are fixed initial conditions, factors influencing the future course and a target corridor, which are used for modelling. In the second step, the influence of economic conditions on energy retrofit rates is endogenously integrated into the stock model. With the extended model, varying CO_2 price curves and a reinvestment of the CO_2 tax are simulated and the results are examined with regard to the climate protection targets.

This thesis presents a model that takes into account the economic framework conditions and the coupling principle², which are dynamically taken into account in the simulation of full retrofit rates. The results show that full retrofit rates of 2%/a over longer periods of time require extreme framework conditions and are unrealistic. The main obstacles are the need for refurbishment (coupling principle), declining energy saving potential in the younger building age classes and deadweight effects with improved funding. As it is not possible to achieve the climate protection targets within realistic tax levels in the model only by adjusting the CO_2 tax (even for reinvestment), a package of measures consisting of economic and legislative framework conditions to achieve the targets is presented instead.

²According to the coupling principle, energy retrofits should be linked to refurbishment, as otherwise it is generally not possible to carry them out economically. To this end, a distinction is often made between energy-related additional costs and "anyhow costs"

Danksagung

Die vorliegende Dissertation wurde während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Fachgebiet Immobilienökonomie der RPTU Kaiserslautern-Landau (vormals TU Kaiserslautern) verfasst. Für alle, die sich für Forschung und Entwicklung interessieren, kann ich eine solche Position nur empfehlen, gerne auch am Fachgebiet Immobilienökonomie der RPTU Kaiserslautern-Landau.

Zuallererst möchte ich mich herzlich bei meinem Doktorvater, Prof. Dr. Björn-Martin Kurrock, für die engagierte Betreuung meiner Dissertation bedanken. Seine stets hilfsbereite Art und das mir entgegengebrachte Vertrauen während meiner Tätigkeit am Fachgebiet Immobilienökonomie haben maßgeblich zu meiner akademischen Entwicklung beigetragen.

Daneben bedanke ich mich ebenso bei Prof. Dr.-Ing. Sabine Hoffmann für die Übernahme der Zweitbetreuung, die Anmerkungen zur Arbeit und die zügige Erstellung des Gutachtens. Bedanken möchte ich mich auch bei Prof. Dr.-Ing. Matthias Pahn für die kurzfristige krankheitsbedingte Übernahme des Prüfungsvorsitzes bei der Disputation.

Ein herzliches Dankeschön gilt auch meinen stets hilfsbereiten aktuellen und ehemaligen Kollegen am Fachgebiet Immobilienökonomie: Jonathan, Asbjörn, Ann-Christin, Philipp, Tillman, Dominik, Konstantin, Nils und Frau Köhler. Bedanken möchte ich mich auch bei den vielen Kollegen, Freunden und Wegbegleitern an den Fachgebieten Gebäudesysteme und Gebäudetechnik sowie Baubetrieb und Bauwirtschaft, die diese Reise zu einer besonderen gemacht haben.

Ganz besonderer Dank gilt dabei meinen Kollegen Daniel Schmidt und Tillman Gauer sowie meinem Bruder Lukas Aldenhoff für ihre detaillierten Anmerkungen zu meiner Entwurfsfassung.

Als letztes gilt mein besonderer Dank meinen Eltern Birgit und Josef Aldenhoff, die mich unterstützt und die mir diese Reise überhaupt erst ermöglicht haben. Ebenso möchte ich auch der gesamten Familie und insbesondere meinen Großeltern danken. Ein ganz besonderer Dank gebührt dabei meiner Frau Kim, die mir trotz Schwangerschaft in der stressigen Zeit der Finalisierung, gekoppelt mit der Firmengründung von AdvisoRE, den Rücken freigehalten hat.

Kaiserslautern, Januar 2024

Dennis Aldenhoff

Inhaltsverzeichnis

Zusammenfassung	i
Abstract	ii
Danksagung	iv
Abkürzungsverzeichnis	viii
Tabellenverzeichnis	x
Abbildungsverzeichnis	xii
1 Einleitung	1
1.1 Ausgangslage & Problemstellung	1
1.2 Zielsetzung & Forschungsfragen	9
1.3 Methodik und Gang der Untersuchung	10
2 Wohngebäudebestand und Wärmeversorgung	17
2.1 Bestand & Gebäudetypologie	17
2.2 Wärmeversorgungsanlagen & Energieträger	25
2.3 Entwicklungen seit 1990	29
2.3.1 Bevölkerungsentwicklung	29
2.3.2 Wohngebäude, Wohnungen & Wohnfläche	32
2.3.3 Neubau & Rückbau	39
2.3.4 Zwischenfazit	41
2.3.5 Modernisierungsraten beim Wärmeschutz	43
2.3.6 Wärmeversorgungsanlagen	47
2.4 Modellierung des Wohngebäudebestands	51
2.4.1 Arten von Wohngebäudebestandsmodellen	51
2.4.2 Überblick über bestehende Modelle & Szenarien	53
2.4.3 Diskussion bestehender Szenarien und Modelle	58
2.5 Bestehende Prognosen & Szenarien	66
2.5.1 Bevölkerungsentwicklung	66
2.5.2 Gebäudebestand	67

2.5.3	Wärmeversorgung	69
2.5.4	Endenergiebedarf	69
2.6	Schlussfolgerungen	70
3	Entwicklung des Wohngebäudebestandsmodells	73
3.1	Energetischer Ausgangszustand Wohngebäudebestand	73
3.2	Ableich Energetischer Ausgangszustand Bilanz Deutschland	83
3.2.1	Endenergie	86
3.2.2	Primärenergie	90
3.2.3	Treibhausgasemissionen	91
3.3	Modellierung der Entwicklung des Wohngebäudebestands	92
3.3.1	Wohnflächenentwicklung	92
3.3.2	Neubau & Rückbau	95
3.3.3	Modernisierungsaktivitäten	96
3.3.4	Wärmeversorgungsentwicklung	105
3.3.5	Ausbau Erneuerbare	106
3.4	Schlussfolgerungen	107
4	Anwendung des Wohngebäudebestandsmodells	109
4.1	Derzeitiger Trend	109
4.2	Anhebung der Modernisierungsrate	114
4.3	Reduzierter Flächenverbrauch	118
4.4	Zielführende Substitution der Wärmeversorgung	122
4.5	Schlussfolgerung	126
5	Modernisierungsraten in Abhängigkeit der Wirtschaftlichkeit	128
5.1	Prozess der Modernisierungsentscheidung	128
5.1.1	Private bzw. Selbstnutzer	129
5.1.2	Gewerbliche und private Vermieter	133
5.1.3	Zwischenfazit Eigentümergruppen	134
5.1.4	Ökonomische Situation bei Integration Klimapaket 2020	135
5.2	Restriktionen bei der Erhöhung der Modernisierungsrate	139
5.3	Wirtschaftlichkeitskalkulation im Modell	140
5.4	Anpassungen aufgrund Preisentwicklungen in 2021 & 2022	144

5.5	Entwicklung der Modernisierungsfunktion in Abhängigkeit der Wirtschaftlichkeit	148
5.6	Integration der Modernisierungsfunktion in Abhängigkeit der Wirtschaftlichkeit in das Gebäudemodell	153
5.7	Anwendung der Modernisierungsfunktion in Abhängigkeit der Wirtschaftlichkeit im Modell	156
5.8	Angepasste Fördermodalitäten 2022	163
5.9	Schlussfolgerungen	164
6	Einfluss zweckgebundener CO_2-Gebühren und erweiterter Maßnahmen	167
6.1	Kalkulation zweckgebundener CO_2 -Gebühren und Integration in das Modell . .	168
6.2	Einfluss zweckgebundener CO_2 -Gebühren auf die Modernisierungsraten	171
6.3	Ergänzende Maßnahmen zur beschleunigten Zielerreichung in 2045	174
6.4	Schlussfolgerungen	180
7	Ergebnisse und Ausblick	185
7.1	Beantwortung der Forschungsfragen & Schlussfolgerungen	185
7.2	Limitationen	193
7.3	Ausblick	196
	Anhang	198
	Literaturverzeichnis	215

Abkürzungsverzeichnis

A/V-Verhältnis:	Außenfläche/(Innen-)Volumen-Verhältnis
AD:	Amortisationsdauer
AGEB	Arbeitsgemeinschaft Energiebilanzen
ARGE	Arbeitsgemeinschaft für zeitgemäßes Bauen
BAK:	Baualtersklasse
BBSR:	Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung
BDEW:	Bundesverband der Energie- und Wasserwirtschaft
BJ:	Baujahr
BKI:	Baukosteninformationszentrum Deutscher Architektenkammern
BMU:	Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit
BMUB:	Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit
BMUV:	Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, nukleare Sicherheit und Verbraucherschutz
BMWi:	Bundesministerium für Wirtschaft und Energie
BMWK:	Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz
BSW:	Bundesverband Solarwirtschaft
BT:	Bauteil
EE:	Endenergie
EFH:	Einfamilienhaus
EnEV:	Energieeinsparverordnung
EZFH:	Ein- & Zweifamilienhäuser
dena:	Deutsche Energie-Agentur
destatis:	Statistisches Bundesamt
DH:	Doppelhaus
dt:	deutsch/deutscher
DWD:	Deutscher Wetterdienst
FK:	Folgekosten
FW:	Fernwärme
ISE:	Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme
IWU:	Institut Wohnen und Umwelt

IKT:	Informations- und Kommunikationstechnik
JAZ:	Jahresarbeitszahl
K:	gegenwärtige Kosten
KD:	Kellerdecke
KfW:	Kreditanstalt für Wiederaufbau
LZK:	Lebenszykluskosten
MFH:	Mehrfamilienhaus
Mod:	Modernisierung
MW:	Mittelwert
NE:	Nutzenergie
NWG:	Nichtwohngebäude
PE:	Primärenergie
PEF:	Primärenergiefaktor
SRU:	Sachverständigenrat für Umweltfragen
RH:	Reihenhaus
RW:	Raumwärme
OG:	Obergeschoss
THG:	Treibhausgas
TGH:	thermische Gebäudehülle
UBA:	Umweltbundesamt
USt:	Umsatzsteuer
VM:	Vollmodernisierungsäquivalente
WE:	Wohneinheit bzw. Wohnung
WFL:	Wohnfläche
WG:	Wohngebäude
WV:	Wärmeverteilung
WVA:	Wärmeversorgungsanlage
WW:	Warmwasser/Warmwasserbereitung
ZFH:	Zweifamilienhaus
ZIA	Zentraler Immobilien Ausschuss

Tabellenverzeichnis

1	Repräsentative Gebäude in der TABULA Webdatenbank ohne Sonderfälle	19
2	Aufteilung in EFH/ZFH & MFH	20
3	Durchschnittliche Wohnungsgrößen nach Baualtersklassen	22
4	Aufteilung der Wohngebäude, Wohnungen & Wohnfläche des Gebäudebestands 2018 nach Baualtersklassen	22
5	Modellierung verschiedener energetischer Wohngebäudetypen	23
6	Aufteilung der Wohnfläche des Gebäudebestands nach Baualtersklassen & Ge- bäudetypen für 2018	24
7	Aufteilung der Hauptenergieträger in Wohngebäuden	26
8	Aufteilung der Hauptenergieträger für Beheizung in EFH nach Baualter des Ge- bäudes	26
9	Aufteilung der Hauptenergieträger für Beheizung in MFH nach Baualter des Gebäudes	27
10	Aufteilung der Deckungsanteile der Endenergieverbräuche für Raumwärme und Warmwasser von PHH in 2018	27
11	Entwicklungen im deutschen Wohngebäudebestand 1995-2018 (Wohngebäude, Wohnungen & Wohnfläche)	30
12	BT-Modernisierungsraten 2010-2016 mit Differenzierung nach Altbauten und EFH zu MFH	44
13	BT-Modernisierungsraten ohne Modernisierung Gebäude <25 Jahre	46
14	Erwarteter Wohnungsbedarf nach Wohnungsmarktprognose 2030	67
15	Vergleich der Wohnfläche in anderen Modellen und Studien	68
16	Vergleich der Wohnflächenentwicklung in anderen Modellen und Studien	68
17	Vergleich der Parameterentwicklung für den Neu- und Rückbau in anderen Mo- dellen und Studien	69
18	Jahresnutzungsgrade verschiedener Wärmeversorgungsanlagen	81
19	Aufteilung Erneuerbare im Modell	85
20	Endenergiebilanz der Feinkalibrierung	88
21	Primärenergie- und Emissionsfaktoren	91
22	Primärenergie- und Emissionsfaktoren Strom & Fernwärme	92
23	Sensitivitätsanalyse Lebensdauer & Ökonomiefaktor	105

24	Vergleich Bilanzen 2018 mit Trendszenario 2050	112
25	Notwendige Förderraten für Break-Even in Abhängigkeit der Amortisationsdauer der Vollkosten	138
26	Energiepreise im Modell für das Jahr 2019	141
27	Spezifische Modernisierungskosten im Jahr 2021	143
28	Arbeitspreisvergleich verschiedener Energieträger im April 2022	145
29	Energiepreise im Modell ab 2022	147
30	Angepasste spezifische Modernisierungskosten im Jahr 2022	147
31	Ökonomiefaktoren ($ecof_{i,j}(n)$) in den Jahren 2020 und 2021 für die Altbau- Bauklassen	153
32	Ergebnisse Szenarien a)-d) vollmodernisierte Anteile, Endenergie und THG-Emissionen in 2050	160
33	Anpassungen der Förderhöhen im Modell ab 2022	164
34	Vergleich der THG-Emissionen ergänzender Maßnahmen	179
35	Vergleich Barwerte verschiedener Modernisierungsmaßnahmen für ein EFH 2016 vs. 2020, (Numerische Ergebnisse zu Abb. 44)	198

Abbildungsverzeichnis

1	Endenergieverbrauch & -intensität im Sektor Private Haushalte	4
2	Schematische Darstellung der Modellierung	12
3	Schematische Übersicht der Vorgehensweise zur Entwicklung der Modernisierungsfunktion in Abhängigkeit der Wirtschaftlichkeit	14
4	Schematische Übersicht für das grundlegende Berechnungsverfahren der Modernisierungsfunktion	16
5	Prozentuale Aufteilung deutscher Gebäudebestand nach Gebäudealtersklassen für 2018	20
6	Anzahl Wohnungen pro Wohngebäude & WFL pro Wohnung 1995-2018	34
7	Wohnungs-Baufertigstellungen und Verhältnis EFH zu MFH 1993-2018	35
8	Vergleich der Gesamtwohnfläche zur Bevölkerungsentwicklung 1995-2018	36
9	Deutschlandweite Baufertigstellungen (WG, WE & WFL) zwischen 1993 und 2018	40
10	Deutschlandweite Abgänge von Wohngebäuden und Wohnungen zwischen 1993 und 2018	41
11	Vergleich Neubauverhältnis EFH/MFH zu Rückbau/Neubau	42
12	Jährliche Zuwachsraten von Wohnfläche, Wohnungen , Wohngebäuden und der Bevölkerung 1996-2018	43
13	Entwicklung der Beheizungsstruktur im deutschen Wohngebäudebestand	48
14	Entwicklung der Absatzzahlen von Wärmeversorgungsanlagen im Vergleich Bestand zu Neubau	50
15	Vergleich Top-Down und Bottom-Up Ansatz für Gebäudebestandsmodelle	52
16	Bilanzgrenzen und Energiefluss in Wohngebäuden am Beispiel Raumwärme	75
17	Endenergieverbräuche in Privaten Haushalten nach Anwendungszweck	78
18	Verbrauchswerte für Nutzwärme vor Kalibrierung im Modell	83
19	Ausgangsverteilung Wärmeversorgungsanlagen pro Baualtersklasse	87
20	Abweichung der Verteilung Wärmeversorgungsanlagen pro Baualtersklasse in Feinkalibrierung	89
21	Verteilung Wärmeversorgungsanlagen pro Baualtersklasse nach Feinkalibrierung	91
22	End-, Primärenergie und THG-Bilanz im Modell 2018	93
23	Vergleich der Bevölkerung- und Wohnflächenentwicklung im Modell	95
24	Übersicht der Wohnflächenparameter im Trendszenario im Modell	96

25	Kennlinie des Lebensdauerfaktors (LDf)	100
26	Sensitivitätsanalyse Lebensdauer; $LDf=2$, $ecof=1$	101
27	Sensitivitätsanalyse Lebensdauerfaktor; $LD=55$, $ecof=1$	101
28	Verteilungsfunktion bei Betrachtung von zwei Vollmodernisierungen	102
29	VM-Raten gesamt und pro BAK im Modell	103
30	Wohnflächenverteilung pro Baualtersklasse im Trendszenario 2050	110
31	Verteilung Wärmeversorgungsanlagen pro Baualtersklasse im Trendszenario 2050	111
32	Gesamtbilanz für Endenergie, Primärenergie und THG im Trendszenario 2050 .	113
33	VM-Raten gesamt und pro BAK bei exogener Erhöhung	115
34	Wohnflächenverteilung pro Baualtersklasse im Szenario erhöhte Modernisierung 2050	116
35	Verteilung Wärmeversorgungsanlagen pro Baualtersklasse im Szenario erhöhte Modernisierung 2050	117
36	Gesamtbilanz für Endenergie, Primärenergie und THG im Szenario erhöhte Mo- dernisierung 2050	118
37	Vergleich der Bevölkerung- und Wohnflächenentwicklung im Szenario reduzierter Flächenverbrauch	119
38	Übersicht der Wohnflächenparameter im Szenario reduzierter Flächenverbrauch .	120
39	Gesamtbilanz für Endenergie, Primärenergie und THG im Szenario reduzierter Flächenverbrauch 2050	122
40	Verteilung Wärmeversorgungsanlagen pro Baualtersklasse im Szenario Moderni- sierung + WVA 2050	124
41	Verlauf des Endenergieverbrauchs und Emissionen im Szenario Modernisierung + WVA 2019-2050	125
42	Gesamtbilanz für Endenergie, Primärenergie und THG Szenario Modernisierung + WVA 2050	126
43	CO_2 -Preisverläufe für die LZK-Analyse	137
44	Barwerte verschiedener Modernisierungsmaßnahmen für ein EFH 2016 vs. 2020 .	138
45	Entwicklungsszenarien für den CO_2 -Preis	142
46	Vergleich der Funktionsverläufe für die drei Gruppen im Modell	151
47	Verteilung der Nutzung von Gas und Wärmepumpe in 2020-2022	156

48	Vollmodernisierungsraten insgesamt und per Baualtersklasse (BAK) in Abhängigkeit der Wirtschaftlichkeit	158
49	Vollmodernisierungsanteile der Baualtersklassen in 2050	159
50	Vergleich der Vermeidungskosten	161
51	Endenergie und THG-Verlauf bei endogen berechneten Ökonomiefaktoren	162
52	Sensitivitätsanalyse Energiekosten	163
53	Vollmodernisierungsraten mit angepasster Förderung 2022	164
54	Einnahmen aus dem Wohngebäudebestand durch den CO_2 -Preis	170
55	Vollmodernisierungsraten insgesamt und per BAK in Abhängigkeit der Wirtschaftlichkeit bei Anwendung der zweckgebundenen CO_2 -Gebühren	172
56	Vollmodernisierungsanteile der Baualtersklassen bei Reinvestition in 2050	173
57	Endenergie und THG-Verlauf bei Reinvestition 2019-2050	174
58	Endenergie und THG-Verlauf in zielkonformen Szenario mit ergänzenden Maßnahmen	180
59	Entwicklung der Bevölkerungszahlen bis 2060 (Mittlere Variante G2-L2-W2) . .	199
60	VM-Raten gesamt und pro BAK bei LD=45 Jahren & $ecof= 0,6$	200
61	VM-Raten gesamt und pro BAK bei LD=50 Jahren & $ecof= 0,75$	200
62	VM-Raten gesamt und pro BAK bei LD=60 Jahren & $ecof= 1,05$	201
63	Umstellbewegungen bei Hauptenergieträgern 2009-2019	202
64	Funktionsverläufe für den Faktor Neubau (blau) und Rückbau (orange)	202

1 Einleitung

1.1 Ausgangslage & Problemstellung

Wohngebäude bieten uns einen privaten Rückzugsort und bedingen durch die schiere Menge sowie die Ansprüche an diesen Rückzugsort einen Großteil des Ressourcenverbrauchs für Baustoffe, Energie und Flächen in Deutschland. Als Konsequenz sind sie auch ein zentraler Bestandteil der Energiewende, deren vorrangiges Ziel der Klimaschutz durch eine Reduktion von Treibhausgasen (THG) ist [89]. Daneben werden für die Energiewende auch Ziele, wie Versorgungssicherheit, Schonung endlicher Ressourcen, der Atomausstieg und weitere Ziele genannt [89]. Während es offensichtlich ist, dass Wohngebäude wichtiger Bestandteil einer Strategie für die Schonung endlicher Ressourcen sein müssen, kann dieser notwendige Wandel auch als Chance genutzt werden. Beispielweise kann die Modernisierung des Wohngebäudebestands in eine Strategie zur Digitalisierung des Bestands integriert werden oder weitergedacht kann die Modernisierung der Wohngebäude ebenfalls zur Versorgungssicherheit beitragen. Dies kann auf vielfältige Weise geschehen: Bezogen auf das Stromnetz können Wohngebäude die Versorgungssicherheit zum Beispiel durch Laststeuerung (Demand-Side-Management) oder eigene Elektrizitätsversorgung und deren Speicherung verbessern. Dementsprechend haben Wohngebäude einen essentiellen Stellenwert und bieten ein hohes Potenzial zur positiven Beeinflussung der Energiewende. Im Umkehrschluss besteht damit auch die Chance Synergien zu nutzen, Kosten zu senken und die Wirtschaftlichkeit von Modernisierungsmaßnahmen zu steigern.

Bezogen auf den Wohngebäudebestand kann eine THG-Reduktion durch Techniken mit verringertem Einsatz von fossilen Brennstoffen bis hin zu einer THG-freien Bereitstellung von Energie (z.B. durch Erneuerbare) und einen geringeren Verbrauch von Energie (höhere Energieeffizienz) geschehen. Diese Einflussmöglichkeiten werden zusammengefasst auch vielfach, in Anlehnung an die Energiewende, als Wärmewende bezeichnet. Eine höhere Energieeffizienz ist dabei nicht zwingend erforderlich für die THG-Reduktion, aber angesichts endlicher Potenziale für Erneuerbare – vor allem innerhalb Deutschlands – definitiv ratsam und dementsprechend auch erklärtes Ziel im Klimaschutzplan 2050³ der Bundesregierung [22].

³Die Bundesregierung hat 2021 das Zieljahr auf 2045 verschärft (siehe [32] oder Anpassung Bundes-Klimaschutzgesetz (KSG) 2021).

Wie der Begriff Wärmewende bereits vermuten lässt, liegt der Fokus auf der Reduzierung des Energieverbrauchs für Raumwärme und Warmwasser und den damit einhergehenden THG-Emissionen. Die Gründe hierfür sind zum einen das Potenzial, da 83,5% des Endenergieverbrauchs der privaten Haushalte noch in 2018 auf Raumwärme und Warmwasser entfielen [2]. Zum anderen kann ein Großteil dieses Endenergieverbrauchs durch Effizienzmaßnahmen wie Dämmen der thermischen Gebäudehülle (TGH) vermieden werden.

Treibhausgas Emissionen in Wohngebäuden

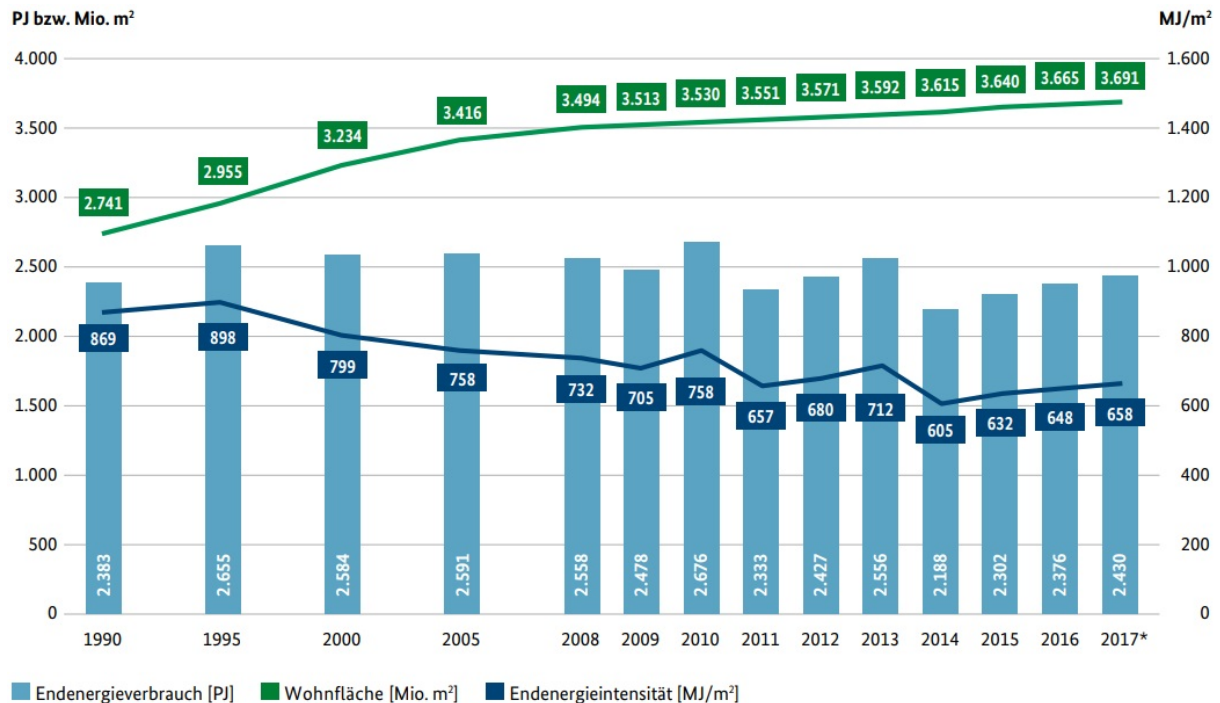
Da die THG-Reduktion zentrales Ziel der Energiewende ist, ist es wichtig, das Fortschreiten und den Erfolg von Maßnahmen anhand des Verlaufs der Emissionen für einzelne Handlungsfelder, wie den Wohngebäuden, bewerten zu können. Den Verlauf der Emissionen, die auf Wohngebäude entfallen, zu rekonstruieren, vor allem bis zum Basisjahr 1990 des Klimaschutzplans der Bundesregierung, ist allerdings nur über Annahmen möglich und sollte entsprechend als Abschätzung gesehen werden. Problematisch ist z.B., dass Wohngebäude zwar die Verursacher des Energiebedarfs sind, oftmals die Emissionen aber an anderer Stelle anfallen. Daraus ergeben sich unterschiedliche Bilanzierungsräume, die genutzt werden können. Zum einen werden Emissionen nach dem Verursacherprinzip (inkl. indirekter Emissionen) und zum anderen nach dem Quellenprinzip (nur direkte Emissionen vor Ort) bilanziert (siehe auch [129]). Beispiele bei denen indirekte Emissionen anfallen sind Fernwärme oder Strom. Nach dem Quellenprinzip werden diese der Energiewirtschaft angerechnet und nicht den Wohngebäuden. Werden somit mehr Heizungen auf Fernwärme umgestellt, sinken die direkten Emissionen der Wohngebäude, ohne dass die Emissionen tatsächlich weniger werden müssen. Darüber hinaus haben Fernwärme und Strom je nach Erzeugung variierende Emissionsfaktoren. Des Weiteren wird bei der Bilanzierung zum Teil zwischen Gebäudearten differenziert, oder es werden nur die Emissionen berücksichtigt, die beispielsweise für die Raumwärme und Warmwasserbereitung entstehen. Beispielsweise wird im Gebäudereport der Dena für 2015 eine Emissionsmenge von 183 Millionen Tonnen für Raumwärme und Warmwasserbereitung, inklusive indirekter Emissionen, angegeben [42]. Hierbei sind alle Gebäude, nicht nur Wohngebäude, berücksichtigt. Im Klimaschutzplan der Bundesregierung von 2016 wird wiederum eine Menge von 119 Millionen Tonnen für alle Gebäude, in diesem Fall allerdings ohne indirekte Emissionen, für das Jahr 2014 angegeben [22].

Auf die Wohngebäude in Deutschland sind im Jahr 2015 129 Millionen Tonnen inklusive indirekter Emissionen für Raumwärme und Warmwasserbereitung entfallen [82]. Im Vergleich zu dem Ausgangswert von 1990, der auf 184-201 Millionen Tonnen geschätzt wird [82], ist dies ein Rückgang von 30-36 %. Die Spanne für 1990 ergibt sich, da nicht genau differenziert werden kann, welcher Anteil des Stroms für Raumwärme und Warmwasserbereitung benötigt wurde [82]. Interpretationen und Vergleiche von THG-Emissionen sind entsprechend immer mit Bedacht hinsichtlich der zugrundeliegenden Daten und Bilanzräumen zu tätigen. Um Maßnahmen im Handlungsfeld Wohnen bewerten zu können, empfiehlt sich eine Bilanzierung nach dem Verursacherprinzip [98], [129]. So wird sichergestellt, dass sich die Emissionen nicht nur an einen anderen Ort verlagert haben, wie es beispielsweise bei der Umstellung auf Fernwärme der Fall sein kann.

Endenergieverbrauch in Wohngebäuden

Der Endenergieverbrauch der privaten Haushalte belief sich 2017 auf 2.430 PJ (siehe Abbildung 1) [26], was einem Anteil von 26 % am gesamtdeutschen Endenergieverbrauch entsprach. Die Abbildung 1 bezieht sich dabei auf den gesamten Endenergieverbrauch der privaten Haushalte inklusive Strom für IKT, Beleuchtung und weitere Verbraucher. Dementsprechend kann bereits von einem hohen Endenergieeinsparpotenzial im Sektor der Privaten Haushalte ausgegangen werden. Wird ebenso die von Gebäude zu Gebäude stark variierende Energieeffizienz beim Anwendungsbereich Raumwärme betrachtet, wird das hohe Potenzial ersichtlich. Als Resultat wird die Reduktion des Endenergiebedarfs als ein wichtiger Teil der Wärmewende gesehen [27]. Allerdings sind, abgesehen von der sinkenden Energieintensität, kaum Fortschritte in Folge der Bemühungen zur Reduktion des Endenergieverbrauchs (EnEV, Modernisierung) zu verzeichnen. Zwar ist der Endenergieverbrauch in 2017 um 5 % im Vergleich zum Referenzjahr (2008) für den deutschen Gebäudebestand gesunken, im Vergleich zum Basisjahr 1990 ist der Wert allerdings um 2 % gestiegen (vgl. Abbildung 1). Ein wesentlicher Grund hierfür wird auch in der Abbildung 1 ersichtlich, ist doch die Wohnfläche von 1990 auf 2017 um 34,7 % angewachsen. Da sich die jährliche Wohnflächenzuwachsrate von 1,5 % pro Jahr zwischen 1990 und 2008 bereits auf 0,62 % pro Jahr zwischen 2008 und 2017 reduziert hat, scheint zumindest der Trend des steigenden Endenergieverbrauchs aufgehalten und die geringere Endenergieintensität in Folge der Modernisierungsbemühungen und energetisch hochwertiger Neubauten führte zu

der besagten 5 % Reduzierung im Vergleich zum Referenzjahr.



* vorläufige Angaben

Abbildung 1: Endenergieverbrauch & -intensität im Sektor Private Haushalte [26]

Während also der Endenergieverbrauch näherungsweise konstant geblieben ist, ist der spezifische Verbrauch pro Quadratmeter um 24,3 % im Bezug zum Basisjahr 1990 gesunken. Die Effekte der gesunkenen Endenergieintensität und des gestiegenen Wohnflächenbedarfs haben sich dementsprechend im Hinblick auf den gesamten Endenergiebedarf gegenseitig aufgehoben.

Die Wohnfläche wächst kontinuierlich, da stetig neue Wohngebäude gebaut, aber im Gegenzug kaum Gebäude rückgebaut werden. Während die jährliche Zubaurate in den Jahren 2010 bis 2015 zwischen 150.000-200.000 Wohneinheiten pro Jahr lag, betrug die Rückbaurate im gleichen Zeitraum ca. 25.000 rückgebaute Wohneinheiten pro Jahr [42]. Sowohl im Neubau als auch im Rückbau gab es dabei auch Zeiten stark erhöhter Bautätigkeit. Während der Neubau in den Jahren nach der Wiedervereinigung bis 2000 seinen Höhepunkt mit teilweise über 500.000 Wohneinheiten pro Jahr hatte, war der Rückbau zwischen 2000 und 2010 auf bis zu 50.000 Wohneinheiten pro Jahr erhöht [42].

Einerseits sorgt der Neubau von Gebäuden durch hohe Standards für eine höhere Energieeffizienz und dementsprechend geringere Endenergieintensität, gleichzeitig benötigt jeder zugebaute Quadratmeter Ressourcen während der Nutzung, wie Energie für Wärme und Beleuchtung, aber auch Ressourcen und Energie für den Bau und die Einrichtung (siehe graue Energie z.B. in [130]).

Transformationspfade zum nahezu klimaneutralen Gebäudebestand

Eine Vielzahl von möglichen Transformationspfaden für den deutschen Gebäudebestand wurde bereits untersucht. Allen gemein ist, dass sie von einer weiterhin wachsenden Wohnfläche ausgehen, die aufgrund des erwarteten starken Bevölkerungsrückgangs ab 2030 zu einer annähernden Stagnation des Wachstums der Wohnfläche führt. Für ein Gelingen dieser Transformationspfade sollte der Durchschnitt der Wohngebäude in 2050 dem heutigen Effizienzhaus 55 entsprechen [27]. Außerdem ist eine stark erhöhte Modernisierungsrate (ca. verdoppelt) essentieller Teil dieser Pfade [60]. Die Umsetzung dieser zweier Ziele gestaltet sich schwierig und vor allem bei der Modernisierungsrate sind kaum Fortschritte zu verzeichnen. Daneben birgt die Annahme einer stagnierenden Wohnflächenentwicklung ab 2030 in den Transformationspfaden die Gefahr die tatsächliche Wohnflächenentwicklung zu unterschätzen und zu einer zusätzlichen Hürde zu werden. Eine aktive Steuerung der Wohnflächenentwicklung wird dabei kaum in Betracht gezogen und steht folglich nicht im Fokus von Unternehmen und Politik. In ersten Untersuchungen zu möglichen Potenzialen einer nachhaltigeren Wohnflächennutzung, wurde ein Einsparpotenzial von 20,4 (73 PJ)⁴ bis 58,9 TWh/a (212 PJ/a), je nach Szenario, für 2030 angegeben [93]. Die Szenarien fokussieren sich dabei auf Zielgruppen mit hohem Potenzial wie z.B. Rentner, die eine im Vergleich der verschiedenen Bevölkerungsgruppen überdurchschnittlich große Wohnfläche pro Kopf besitzen. Damit die Potenziale, die sich hier ergeben, auch gehoben werden können, empfiehlt sich eine frühzeitige Einbindung der Wohnflächenentwicklung in die Strategie für die Energiewende. Dies wird z.B. auch von der Bundesarchitektenkammer empfohlen [11].

Flächenverbrauch für Siedlungs- & Verkehrsflächen

Neben der Energie & THG Reduktion wird auch die tägliche Flächenneuanspruchnahme als Problem von der EU und der Bundesregierung eingestuft. Auch hier werden Zielvorgaben ge-

⁴Zum Vergleich: Endenergiebedarf gesamt 2.430 PJ (2017) in Abbildung 1.

macht. So soll die Flächenneuanspruchnahme bis 2030 in Deutschland auf 30 ha pro Tag⁵ sinken [33] und die EU-Kommission empfiehlt das Ziel einer „netto-Null“ in 2050 [66], also eine Flächenkreislaufwirtschaft. Diese Empfehlung wird von der Bundesregierung unterstützt und als langfristiges Ziel ebenfalls verfolgt. Um das Ziel zu erreichen, wurde unter anderem die Einführung einer regulatorischen Maßnahme, des Flächenzertifikatshandels, vorgeschlagen. Dieser soll ähnlich dem Emissionszertifikatshandel durch feste Vorgaben die Flächenneuanspruchnahme steuern. Unberücksichtigt ist bis jetzt, ob diese Maßnahme auch Einfluss auf die größte Ursache der Flächenneuanspruchnahme, den Wohnungsbau [67], und damit auf die Entwicklung der Wohnfläche hat. Ebenso ist fraglich, ob durch einen Flächenzertifikatshandel der Neubau zurückgehen würde, sich andere Bauweisen durchsetzen würden, oder beispielsweise der Rückbau & Ersatzbau zunehmen würden. Somit kann derzeit keine Aussage darüber getroffen werden, ob der Flächenzertifikatshandel im Endeffekt einen positiven Einfluss auf die Bemühungen der Wärmewende hat.

In Faulstich et al. [67] wird ein umfangreiches Gutachten zur Umweltpolitik mit sechs Schwerpunktthemen gegeben. Eines dieser Schwerpunktthemen ist der Flächenverbrauch und der demografische Wandel. Während Wohnen einer der Haupttreiber des Flächenverbrauchs ist, ist paradoxerweise der Flächenverbrauch in Regionen mit hohem Bevölkerungswachstum eher gering, da Mieten und Bodenpreise hoch sind. In Regionen mit abnehmender Bevölkerung ist der Flächenverbrauch hingegen relativ hoch [67]. Der Sachverständigenrat für Umweltfragen (SRU) empfiehlt, die Senkung des Flächenverbrauchs auf netto Null beizubehalten und Instrumente für eine wirksame Flächenpolitik zu nutzen sowie fortzuentwickeln [67]. Eines dieser Instrumente ist der Flächenhandel, welcher auf seine Praxistauglichkeit untersucht werden sollte. Eine Verringerung des Flächenverbrauchs steht dabei nicht im Widerspruch zum derzeitigen Wohnungsbedarf, da vor allem günstiger Geschosswohnraum in Ballungsräumen benötigt wird [67]. Mehrfamilienhäuser haben einen wesentlich geringeren Grundstücksflächenverbrauch [67] (Grundstücksfläche pro Wohnung im EFH 732 m^2 , MFH 112,5 m^2 [88]).

Wirtschaftlichkeit von Modernisierungsmaßnahmen

Studien wurden durchgeführt, um den Entscheidungsprozess von Gebäudeeigentümern hinsichtlich energetischer Modernisierung zu untersuchen. Viele unterschiedliche Gründe wurden dabei

⁵Flächenverbrauch 2023: 55 ha pro Tag [23].

identifiziert, die eine Individualität bezogen auf die Situation der Gebäudeeigentümer belegen [107], [116]. Weiterhin wurden auch ökonomische Aspekte als sehr wichtig für die Entscheidungsfindung eingestuft [96], [107]. Vielfach wird Wirtschaftlichkeit auch als wichtigster Entscheidungsgrund [80] bzw. als Voraussetzung genannt. Die zwei entscheidenden ökonomischen Hindernisse sind Wirtschaftlichkeit und hohe Investitionskosten. Viele Gebäudeeigentümer sehen die Wirtschaftlichkeit einer energetischen Modernisierung als problematisch oder zumindest als zweifelhaft an [107], [128]. Da die Intention des modernisierenden Gebäudeeigentümers hauptsächlich die Reduktion des Energiebedarfs bzw. der Energiekosten ist [116], führt dies zu einem entsprechend starken Hindernis. Experten und Wissenschaft sind sich allerdings einig, dass die Wirtschaftlichkeit bei Modernisierungen gegeben ist. Eine entscheidende Einschränkung ist dabei, dass die Modernisierung wirtschaftlich ist, wenn ohnehin eine Sanierung geplant ist. Infolgedessen werden die notwendigen Kosten für die Sanierung, die den größeren Anteil⁶ der Modernisierungskosten ausmachen, nicht miteinbezogen. Übrig bleiben die energiebedingten Mehrkosten für eine Modernisierung. In diesem Fall ergeben sich Amortisationsdauern, die je nach Einbezug von Fördermitteln auch attraktive 5-15 Jahre erreichen. Eine Amortisationsdauer über 15 Jahren wird dabei als kritisch für die Akzeptanz angesehen [80], [117].

Die Amortisation der Vollkosten einer energetischen Modernisierung in einem angemessenen Zeitrahmen ist allerdings sehr unwahrscheinlich. Zum Beispiel wird in Streicher et al. [119] beschrieben, dass nur 3 % der potentiellen energetischen Modernisierungen in der Schweiz ökonomisch sinnvoll sind, wenn die Vollkosten der Modernisierung angesetzt werden. Auch in Deutschland ist eine Modernisierung bei Ansatz der Vollkosten wirtschaftlich kritisch. Wirtschaftlich wird die Modernisierung, wenn ohnehin Sanierungsmaßnahmen am Gebäude, wie Erneuerung des Dachs oder neue Fenster angestrebt werden. In diesem Fall lassen sich zusätzliche Kosten für eine energetische Verbesserung der Gebäudehülle über zukünftige Energieeinsparungen abdecken. Das bedeutet allerdings, dass sich die Modernisierungsrate an typischen Instandsetzungsraten orientiert und diese sind von den Lebensdauern der Bauteile abhängig.

Durch eher stagnierende Energiepreise für fossile Energieträger in der letzten Dekade (2010-2020) hat sich die Wirtschaftlichkeit allerdings zusätzlich verschlechtert. Zuvor wurde mit kon-

⁶Bei einer Vollmodernisierung eines Einfamilienhauses können ca. 60 % als Sowieso-Kosten und 40 % als energiebedingte Mehrkosten deklariert werden. Die Aufteilung variiert je nach Ausführung und Gebäude (vgl. [79] oder 29-61% in [76]).

tinuierlich hohen Preissteigerungen ($>5\%/a$) für fossile Energieträger gerechnet. Daneben werden die ohnehin längeren Amortisationsdauern für Modernisierungen bei Ansatz der Vollkosten und nicht der energiebedingten Mehrkosten durch diesen Umstand stärker beeinflusst. Hintergrund ist, dass sich die hohen jährlichen prozentualen Steigerungen mit zunehmender Laufzeit deutlich mindernd auf die Amortisationsdauer auswirken. Die Amortisationsdauern bei Ansatz der Vollkosten sind ohne die Annahme hoher Preissteigerungsraten in der Regel so hoch, dass keine Wirtschaftlichkeit gegeben ist (siehe Punkt 3 S.49 [76]).

Die Finanzierungslücke bei den Vollkosten wird als so groß angesehen, dass sie nicht durch Förderung gedeckt werden kann [76]. Selbst mit Förderzuschüssen von 60-70 % lassen sich durchschnittlich nur Amortisationsdauern von 25 Jahren bei Ansatz der Vollkosten erreichen. Folglich wäre eine Wirtschaftlichkeit von Modernisierungen so nicht von der Sanierung zu entkoppeln [76]. Daraus resultiert, dass die Modernisierungsraten durch das Kopplungsprinzip an die Sanierungszyklen gebunden sind [35]. Entsprechend empfiehlt Cichorowski [35] die energetische Modernisierung zu einem ähnlich „guten Geschäft“ zu machen, wie es in den Anfangsjahren für die Einspeisung von PV der Fall war. Das bedeutet für eine Verdopplung der Modernisierungsrate sind signifikant bessere wirtschaftliche Rahmenbedingungen notwendig oder der Sanierungsbedarf müsste sich in der gleichen Größe erhöhen. Auch wenn von einem Sanierungsstau ausgegangen wird, ist eine solch substanzielle Steigerung im Bereich einer Verdoppelung bis Verdreifachung sehr unwahrscheinlich. Ziel wäre es dementsprechend die ökonomische Situation von Modernisierungen so weit zu verbessern, dass Hauseigentümer mit hohen Auswirkungen auf die THG-Emissionen im Gebäudebestand sich dafür entscheiden eine Sanierung zeitlich vorzuziehen, um eine zielführende Modernisierung durchzuführen. Zielführend wäre dabei der Einsatz effizienter und emissionsarmer Heizungstechnik sowie das Erreichen niedriger Endenergiebedarfe durch die Modernisierung der TGH.

Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass der deutsche Wohngebäudebestand sehr komplex, vielfältig und essentieller Teil der Energiewende ist. Derzeit ist bei diesem Teil der Energiewende, der Wärmewende, aber noch kein zielführender Pfad erkennbar. Entscheidendes Hindernis bei der Erhöhung der Modernisierungsrate war und ist die mangelhafte Wirtschaftlichkeit von energetischen Modernisierungen. Die Einführung der CO_2 -Steuer für den Gebäudebestand könnte dieses Hindernis verringern. Eine ganzheitliche Betrachtung auch unter Berücksichti-

gung weniger beachteter Elemente wie der Wohnflächenentwicklung ist wichtig und empfiehlt sich gerade vor dem Hintergrund der neuen wirtschaftlichen Gegebenheiten.

1.2 Zielsetzung & Forschungsfragen

Zielsetzung

Zentrales Ziel dieser Arbeit ist die Modellierung des deutschen Wohngebäudebestands, um unter der Annahme, dass die Wirtschaftlichkeit essentielles Hindernis zur weiteren Steigerung der Modernisierungsrate ist, den Einfluss veränderter wirtschaftlicher Bedingungen auf die Transformationspfade des Wohngebäudebestands zu bestimmen. Aus der Modellierung sollen neue Rückschlüsse unter aktuellen Bedingungen auf Voraussetzungen (Modernisierungsrate, energetischer Zielstandard für Gebäude, ...) zur Zielerreichung bis 2050 bestimmt und dargelegt werden wie diese durch Beeinflussung der Wirtschaftlichkeit (CO_2 -Steuer, Rückfluss der CO_2 -Abgaben) erreicht werden könnten.

Da während des Bearbeitungszeitraums das Zieljahr von der Bundesregierung von 2050 auf 2045⁷ verschärft wurde, werden explizit auch Möglichkeiten zur Erreichung der Ziele in 2045 in dieser Arbeit untersucht.

Forschungsfragen

Derzeitiger Trend:

1. Wie kann die Transformation des Wohngebäudebestands modelliert werden? Wie sehen Transformationspfade (Geschwindigkeit der Transformation und bezogen auf die Zielwerte 2050) bei Fortsetzung des derzeitigen Trends aus?

Entwicklung neuer Szenarien durch exogene Variationen (Neubau, Rückbau, Modernisierung, Wohnflächenverbrauch):

2. Wie müsste die Modernisierungsrate aus heutiger Sicht angepasst werden, um die Ziele für 2050 beizeitigem Trend realistisch zu erreichen?

⁷Die Bundesregierung hat 2021 das Zieljahr auf 2045 verschärft (siehe [32] oder Anpassung Bundes-Klimaschutzgesetz (KSG) 2021).

3. Mit welchen Variationen von Neubau-, Rückbau- und Modernisierungsrate könnte das Ziel realistisch erreicht werden?

Untersuchung zielführender wirtschaftlicher Rahmenbedingungen durch endogene Simulation der Modernisierungsrate in Abhängigkeit der Wirtschaftlichkeit von Modernisierungsmaßnahmen und Integration der CO_2 -Steuer:

4. Wie kann die Beziehung der Modernisierungsrate zur Wirtschaftlichkeit von Modernisierungsmaßnahmen modelliert werden?
5. Welche Auswirkungen hat das „Klimapaket“ (beschlossen im Klimaschutzprogramm 2030) mit seinen geänderten wirtschaftlichen Rahmenbedingungen (CO_2 -Steuer/Fördersituation) in den Simulationen?
6. Welchen Einfluss haben Variationen der CO_2 -Steuer auf die Modernisierungsrate, wenn die Modernisierungsrate endogen in Abhängigkeit von der Wirtschaftlichkeit der Modernisierungsmaßnahmen in das Modell integriert wird?
7. Wie ist der Verlauf der CO_2 -Abgaben aus dem Wohngebäudebereich im Betrachtungszeitraum bei Variation der CO_2 -Steuer?
8. Welchen Einfluss hätte die Änderung der CO_2 -Steuer in eine zweckgebundene Gebühr auf die Modernisierungsrate?

1.3 Methodik und Gang der Untersuchung

In Kapitel 2 werden die Grundlagen zum deutschen Wohngebäudebestand dargelegt. Dies beinhaltet den derzeitigen Status Quo, die Entwicklung des Wohngebäudebestands seit 1990, die weitere Entwicklung der Bevölkerungszahlen, Gebäude und Wohnfläche, sowie Merkmale und Limitationen bestehender Wohngebäudebestandsmodelle.

Zur Beantwortung der Forschungsfragen wird ein Wohngebäudebestandsmodell entwickelt. Für das Modell wird ein Bottom-Up Ansatz gewählt, welches wiederum mit einer Top-Down erstellten Bilanz, der nationalen Energie- & Treibhausgasbilanz in Deutschland abgeglichen/kalibriert werden soll.

- 1. Forschungsfrage: Wie kann die Transformation des Wohngebäudebestands modelliert werden und wie sehen Transformationspfade (Geschwindigkeit der Transformation und bezogen auf die Zielwerte 2050) bei Fortsetzung des derzeitigen Trends aus?**

Aufbauend auf dem Grundlagenteil wird ein Wohngebäudebestandsmodell in MATLAB entwickelt. Für das Modell wird ein Bottom-Up Ansatz gewählt, welches wiederum mit einem Top-Down Ansatz für die Energie- und Treibhausgasbilanz in Deutschland abgeglichen wird. Es wird untersucht, ob aus der Verbindung dieser Ansätze Rückschlüsse auf den derzeitigen Modernisierungsstand im Wohngebäudebestand geschlossen werden kann und ob sich diese grundsätzlich mit den Ergebnissen anderer Institute (z.B.: IWU, ARGE) decken. Für die Fortschreibung des Trends werden auch Prognosen für den Ausbau der Erneuerbaren und der Wärmeversorgungsanlagen integriert, um den Primärenergiebedarf und die THG-Emissionen simulieren zu können. Die Ergebnisse werden mit bekannten Ergebnissen anderer Modelle abgeglichen (weitere Verifizierung des Modells und Aktualisierung der Ziel Hilfsgröße Modernisierungsrate). Die Vorgehensweise bei der Modellierung ist in Abbildung 2 dargestellt.

- 2. Forschungsfrage: Wie müsste die Modernisierungsrate aus heutiger Sicht angepasst werden, um die Ziele für 2050 bei derzeitigem Trend realistisch zu erreichen?**

Das entwickelte Modell wird genutzt, um den Trend, sofern er nicht bereits zielführend ist, durch Anpassung der Modernisierungsrate so zu verändern, dass die Ziele für 2050 erreicht werden. Die Anpassung erfolgt heuristisch und soll als Zielsetzung bzw. Impuls für künftige politische Maßnahmen dienen, mit denen die Modernisierungsrate aktiv beeinflusst werden kann.

- 3. Forschungsfrage: Mit welchen Variationen von Neubau-, Rückbau- und Modernisierungsrate könnte das Ziel realistisch erreicht werden?**

Unter der Annahme, dass nicht nur die Modernisierungsrate aktiv beeinflusst werden kann, sondern ebenfalls Neubau und Rückbau, werden weitere Szenarien durch eine Variation der drei Parameter in realistischen Dimensionen entwickelt.

- 4. Forschungsfrage: Wie kann die Beziehung der Modernisierungsrate zur Wirtschaftlichkeit von Modernisierungsmaßnahmen modelliert werden?**

Schema Gebäudebestandmodellierung

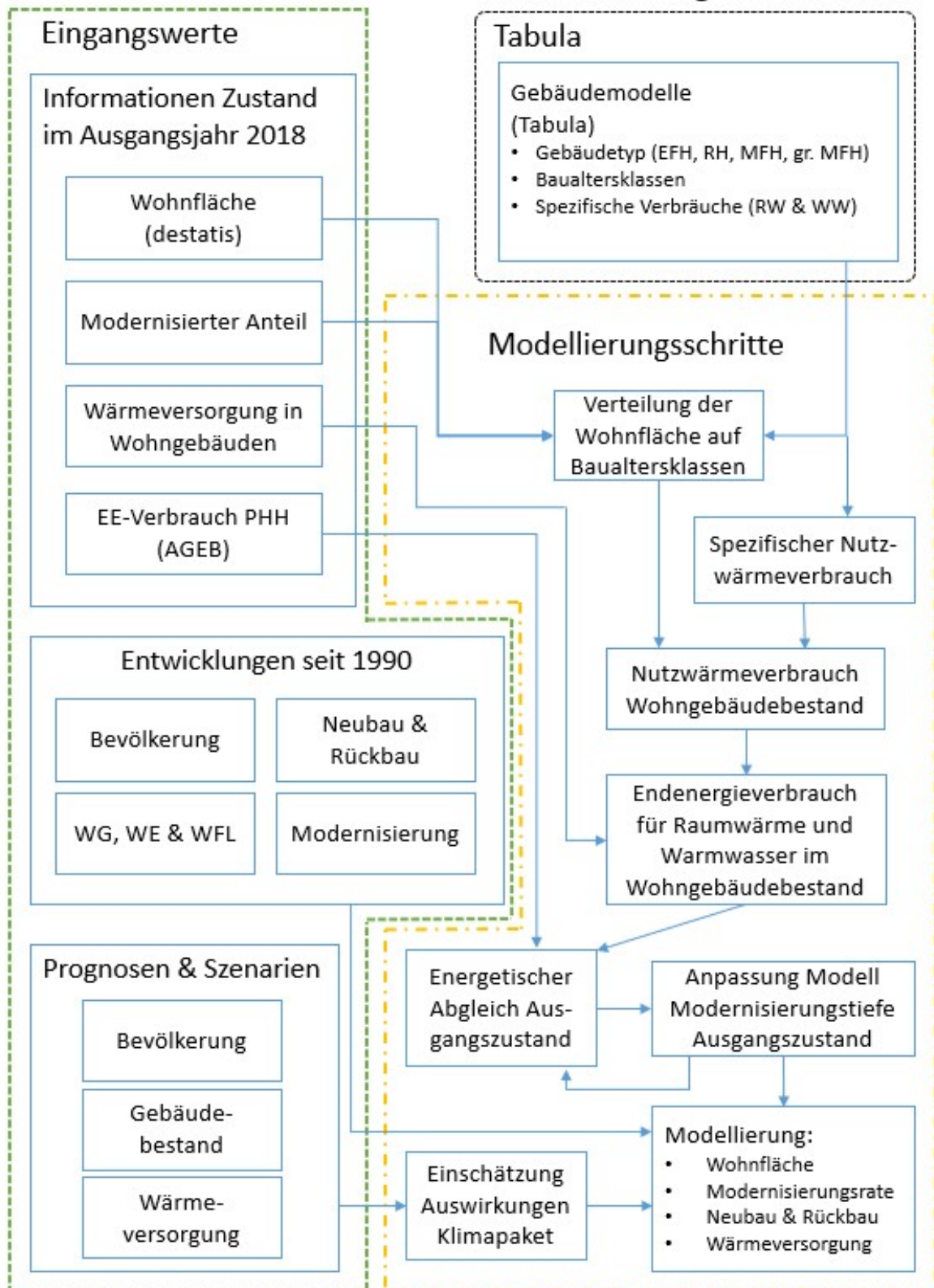


Abbildung 2: Schematische Darstellung der Modellierung

Die Modernisierungsrate soll in Abhängigkeit von Wirtschaftlichkeitsparametern im Modell berechnet werden. Dazu werden das Entscheidungsverhalten der Gebäudeeigentümer bei Investitionen für Modernisierungen, Restriktionen und Erkenntnisse aus dem Gebiet der Verhaltensökonomie (Behavioral Economics) untersucht. Nach Möglichkeit wird hieraus eine vereinfachte (nicht Fokus der Arbeit) Funktion bestimmt (siehe rechte Seite Abbildung 3). Durch berechnete und gegebene Daten aus dem Gebäudebestandsmodell wird die Amortisationsdauer oder der Barwert der Investition berechnet. Entscheidungen zwischen Modernisierungskonzepten werden auf Basis der Amortisationsdauer oder des Barwerts integriert. Die Vorgehensweise ist auf der linken Seite in Abbildung 3 und im oberen Teil der Abbildung 4 gegeben.

5. Forschungsfrage: Welche Auswirkungen hat das „Klimapaket“ (beschlossen im Klimaschutzprogramm 2030) mit seinen geänderten wirtschaftlichen Rahmenbedingungen (CO_2 -Steuer/Fördersituation) in den Simulationen?

Die ökonomischen Auswirkungen des „Klimapakets“ (beschlossen 2019 im Klimaschutzprogramm 2030 [20]) werden in das Modell integriert und mit Ergebnissen aus dem Trendszenario, in dem kein Einfluss des Klimapakets integriert ist, verglichen. Die Ergebnisse werden daneben Studienergebnissen zur Auswirkung des Klimapakets gegenübergestellt und bieten so eine weitere Validierungsmöglichkeit für das Modell.

6. Forschungsfrage: Welchen Einfluss haben Variationen der CO_2 -Steuer auf die Modernisierungsrate, wenn die Modernisierungsrate endogen in Abhängigkeit von der Wirtschaftlichkeit der Modernisierungsmaßnahmen in das Modell integriert wird?

Nachdem die Modernisierungsrate endogen in das Modell integriert ist, wird die Preisfunktion für die CO_2 -Steuer im Betrachtungszeitraum variiert, um den Einfluss auf die Modernisierungsrate und die Zielerreichung im Wohngebäudebereich zu beurteilen.

7. Forschungsfrage: Wie ist der Verlauf der CO_2 -Abgaben aus dem Wohngebäudebereich im Betrachtungszeitraum bei Variation der CO_2 -Steuer?

Die CO_2 -Abgaben im Wohngebäudebereich können mit den Informationen zu Beginn des Betrachtungszeitraums und deren weiterer Entwicklung im Modell für jedes Jahr im Prognosezeitraum berechnet werden. Entscheidend hierfür sind neben dem Verlauf des Preises, der durch

Endogene Modellierung der Modernisierungsrate auf Basis von Amortisationsdauern

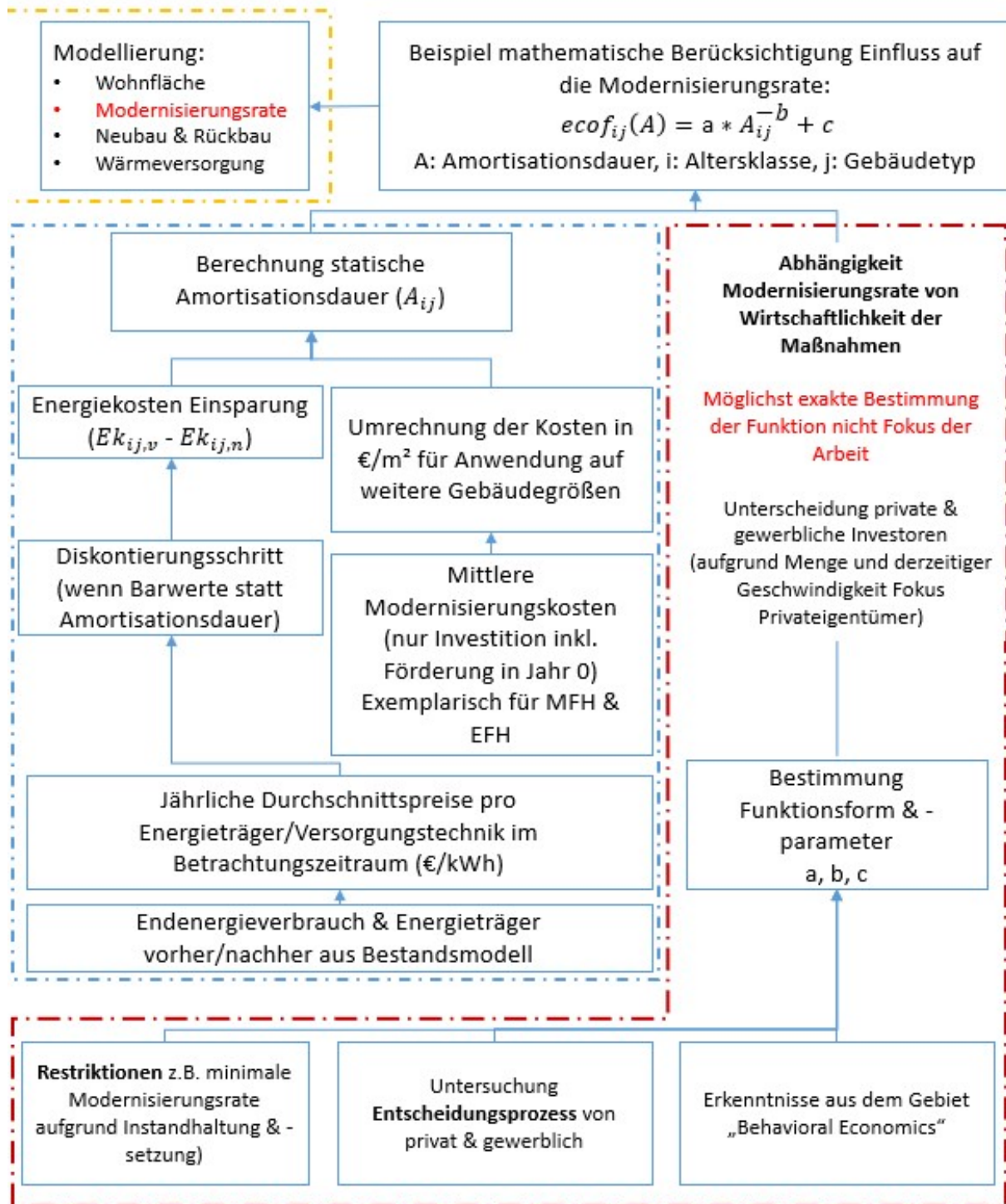


Abbildung 3: Schematische Übersicht der Vorgehensweise zur Entwicklung der Modernisierungsfunktion in Abhängigkeit der Wirtschaftlichkeit (hier beispielhaft auf Basis der Amortisationsdauer)

eine Funktion des CO_2 -Preises (siehe Forschungsfrage 6) angegeben wird, die Entwicklung der jährlichen CO_2 -Emissionen aus dem Gebäudebestand, welche sich durch die Beheizungsstruktur und den Energiebedarf der Gebäude im jeweiligen Jahr ergeben.

8. Forschungsfrage: Welchen Einfluss hätte die Änderung der CO_2 -Steuer in eine zweckgebundene Gebühr auf die Amortisationsdauer von Modernisierungsmaßnahmen und dadurch auf die Modernisierungsrate?

Zur Beantwortung der Forschungsfrage 8 werden die berechneten jährlichen Abgaben aus der in eine zweckgebundene Gebühr umgewandelten CO_2 -Steuer als ergänzende Förderung bei der Modernisierung eingesetzt. Dadurch werden die Modernisierungskosten für Eigentümer verringert und entsprechend die Amortisationsdauer beeinflusst. Es ergibt sich eine Rückkopplung mit der Modernisierungsrate und damit auch auf die Höhe der zukünftigen CO_2 -Abgaben. Die Höhe der Förderung aus CO_2 -Abgaben wird prozentual gleichverteilt auf die unterschiedlichen Investitionskosten des folgenden Jahres veranschlagt und spiegelt damit eine erwartete, nicht zwangsweise eine gezahlte, Förderungshöhe wieder. Ob letztlich die theoretische im Voraus berechnete Förderungshöhe für eine bessere Planbarkeit auch der tatsächlich gezahlten entspricht, muss politisch entschieden werden. Im Modell wird die im Vorfeld berechnete Förderungshöhe als gesetzt angenommen, auch wenn damit die tatsächlich zur Verfügung stehenden Mittel überzeichnet werden. Die Vorgehensweise bei der Berechnung sind im unteren Teil der Abbildung 4 dargestellt.

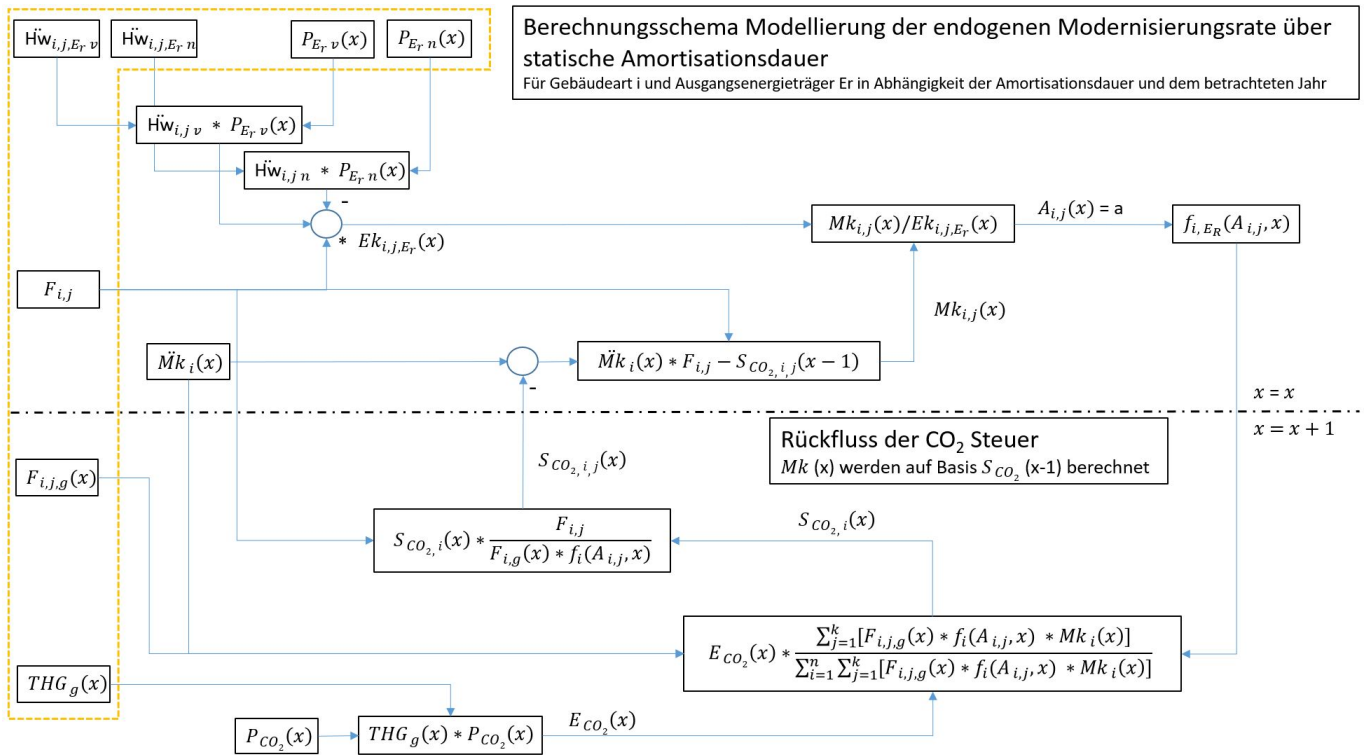


Abbildung 4: Schematische Übersicht für das grundlegende Berechnungsverfahren der Modernisierungsfunktion in Abhängigkeit der Wirtschaftlichkeit inkl. Rückfluss einer zweckgebundener CO_2 -Steuer bei Nutzung der statischen Amortisationsdauer

- \ddot{H}_w : Flächenbezogener Endenergiebedarf für Raumwärme und Warmwasser [kWh/m^2a]
 P : Funktion des Energiepreises für Energieträger E_r oder CO_2 -Preis [$€/kg$]
 E_k : Energiekosten bzw. Differenz der Energiekosten/Einsparungen)
 A : Amortisationsdauer [Jahre]
 F : Fläche Gebäude oder Funktion der Fläche für Gebäudetyp & -altersklasse [m^2]
 f : Funktion für die Modernisierungsrate [%/a]
 M_k : Funktion der Modernisierungskosten [€]
 E_{CO_2} : Jährliche Abgaben CO_2 -Steuer aus dem Wohngebäudesektor [€/a]
 S_{CO_2} : Resultierende Förderung aus dem Rückfluss der CO_2 -Steuer [€/a]
 THG : Funktion der Emissionsmenge des Wohngebäudesektors [kg/a]

Indizes:

- i : Gebäudetyp
 j : Gebäudealtersklasse
 v : vorher
 n : nachher
 E_r : Energieträger r
 g : gesamt

Laufvariablen:

- a : Jahre
 x : Berechnungsjahr

2 Wohngebäudebestand und Wärmeversorgung

Für die Erstellung aussagekräftiger Modelle ist es notwendig den Zustand des Untersuchungsgebietes im Vorfeld entsprechend detailliert zu beleuchten. Nur so können Abstraktionen und Vereinfachung, die unter anderem auch in Folge einer fehlenden allumfassenden Datenlage zwangsweise notwendig werden, mit möglichst geringen Genauigkeitseinbußen getätigt werden. Um den Einfluss verschiedener Maßnahmen im deutschen Gebäudebestand hinsichtlich Primärenergie und THG-Einsparungspotenzialen bewerten zu können, ist dementsprechend die Kenntnis der entscheidenden Parameter, wie beispielsweise die Anzahl, Art, Wärmeversorgung, energetischer Zustand der Wohngebäude, sowie deren Entwicklungen in den letzten Jahren ausschlaggebend.

Im Kapitel 2 Wohngebäudebestand und Wärmeversorgung werden der derzeitige Wohngebäudebestand und dessen Wärmeversorgung detailliert betrachtet. Dies geschieht, um notwendige Informationen für die Modellierung des Wohngebäudebestands bereitzustellen. Hierzu wird in den Abschnitten 2.1 und 2.2 zuerst auf den derzeitigen Stand eingegangen. Die Informationen werden dabei direkt so weit aufbereitet, dass diese im Modell verwendet werden können. In Abschnitt 2.3 wird daraufhin der Blick auf die Entwicklungen im Wohngebäudebestand seit 1990 gelegt. Diese Betrachtung dient der Vorbereitung zur Entwicklung mathematischer Funktionen für Parameter im Gebäudebestandsmodell. In Abschnitt 2.4 werden bestehende Gebäudebestandsmodelle betrachtet und gegenübergestellt. Dies dient einerseits der Analyse bestehender Ergebnisse und andererseits dem Aufzeigen von etwaigen Verbesserungspotenzialen. Abschnitt 2.5 ist das logische Gegenstück zu Abschnitt 2.3 und befasst sich mit bestehenden Szenarien und Erkenntnissen zur weiteren Entwicklung wichtiger Rahmenbedingungen im Wohngebäudebestand.

2.1 Bestand & Gebäudetypologie

Im nachfolgenden Abschnitt soll ein detailliertes Bild des deutschen Wohngebäudebestands für die Modellierung gegeben werden. Insbesondere für die Berechnung von Einsparpotenzialen zum Beitrag bei der Energie- und Wärmewende sind Daten notwendig, die über die bloße Anzahl von Gebäuden hinausgehen, denn Wohngebäude sind sehr unterschiedlich in ihrer Bauart. Eine gute Basis für die Berechnung von Potenzialen ist die Wohnfläche, da durch eine einheitliche Be-

zugsgröße der Einfluss unterschiedlicher Gebäudegrößen verringert werden kann. Trotzdem ist auch beim Bezug auf die Wohnfläche eine Unterscheidung der Gebäudetypen notwendig. Größere Gebäude wie Mehrfamilienhäuser weisen durch ihre Bauweise ein besseres Verhältnis der Außenfläche zum Innenvolumen (A/V-Verhältnis) auf, womit sich eine geringere wärmeübertragende Außenfläche pro Quadratmeter Wohnfläche ergibt. Somit beeinflusst das A/V-Verhältnis die Größe der thermischen Verluste über die Gebäudehülle. Wird der Endenergiebedarf auf die Wohnfläche bezogen, sind, neben dem Gebäudetyp, auch die Güte der thermischen Gebäudehülle und das Verbrauchsverhalten der Nutzer wichtige Faktoren. Wird aufgrund der Menge angenommen, dass das Verbrauchsverhalten dem rechnerisch erwarteten Durchschnitt entspricht, verbleibt neben den Gebäudetypen die Güte der Gebäudehülle als wesentlicher Einflussfaktor. Letztere wird maßgeblich vom Baualter und dem Modernisierungsstand des Gebäudes bestimmt. Das Baualter ist insofern entscheidend, da hiermit entsprechende typische Bauweisen und typische Bauteilgrößen (z.B. Fenstergröße) einhergehen, welche entscheidenden Einfluss auf die energetische Gebäudehülle haben. Der Modernisierungsstand ist ein Indikator dafür, welcher Anteil der Gebäude noch der (durchschnittlichen) energetischen Güte des jeweiligen Baualters entspricht. Dabei ist es notwendig auch die Güte der Modernisierungen zu quantifizieren.

Zusammenfassend wird somit für die Modellierung die **Verteilung der Wohnfläche** auf

1. Gebäudetypen,
2. das Baualter sowie
3. den Anteil und Güte der modernisierten Gebäude

benötigt.

Baualtersklassen & Gebäudetypologie nach IWU

Um nicht jedes Baujahr einzeln zu betrachten, werden Baujahre, die sich durch typische Bauweisen, Bauteilgrößen und Anforderungen an den Bau ähneln, in Baualtersklassen zusammengefasst. Aus dieser Überlegung gehen die Baualtersklassen nach IWU hervor [86]. Weiterhin ist die Gebäudetypologie des IWU, welche online im TABULA Webtool aufgerufen werden kann [87], essentiell, da sie umfangreiche Informationen für ein repräsentatives Gebäude pro Gebäu-

detyp und Baualtersklasse bereitstellt.

Die Gebäudetypologie bietet grundlegende bautechnische Informationen hinsichtlich Abmessungen und typischen baulichen Ausführungen sowie vorgeschlagene Modernisierungskonzepte mit dem rechnerischen Energiebedarf (Primär- & Endenergie) nach der Modernisierung für repräsentative Gebäude. Hierdurch bietet sie wichtige Informationen, um den deutschen Gebäudebestand modellieren zu können. In der Gebäudetypologie wird dabei zwischen vier Gebäudetypen sowie Sonderfällen, wie Fertighäusern, Hochhäusern und typischen Apartmentblocks der neuen Bundesländer, unterschieden. In Tabelle 1 ist eine Auflistung der im TABULA Webtool hinterlegten repräsentativen Gebäude für die vier Gebäudetypen dargestellt.

Tabelle 1: Repräsentative Gebäude in der TABULA Webdatenbank ohne Sonderfälle [87] (X: vorhanden, -:nicht vorhanden)

Baualtersklasse	EFH	RH	kl. MFH	gr. MFH
bis 1859	X	–	X	–
1860-1918	X	X	X	X
1919-1948	X	X	X	X
1949-1957	X	X	X	X
1958-1968	X	X	X	X
1969-1978	X	X	X	X
1979-1983	X	X	X	–
1984-1994	X	X	X	–
1995-2001	X	X	X	–
2002-2009	X	X	X	–
2010-2015	X	X	X	–
2016+	X	X	X	–

Deutscher Wohngebäudebestand

Der Fortschreibung des Mikrozensus 2014 des Statistischen Bundesamtes können die letzten aggregierten Zahlen für den Gebäudebestand entnommen werden. Demnach beläuft sich die Anzahl der Wohnungen in Deutschland 2018 auf 42.235.402 Wohnungen mit 3,88 Mrd. m^2 Wohnfläche⁸ in 19.053.216 Wohngebäuden [51]. Für die Aufteilung in Baualtersklassen können Informationen aus den Ergebnissen des Mikrozensus 2014 [48], der ersten Datenerhebung des IWU [58] sowie der Datenerhebung für 2016 (Stichtag 31.12.2016) [36] entnommen werden. Für die Modellierung des Gebäudebestands wird die Datenerhebung nach [36] genutzt, da diese

⁸Inklusive 125,2 Mio. m^2 (3,22%) Wohnfläche in Nichtwohngebäuden [51].

die Baualtersklassen nach IWU nutzt und die jüngste der drei genannten Datenerhebungen darstellt. Da die Datenerhebung der Situation Ende 2016 entspricht, wurden die Jahre 2017 und 2018 anhand der Daten aus [51] ergänzt. Während die zugebauten Wohngebäude entsprechend separat für 2017 und 2018 ausgewiesen sind, sind die Abgänge gewichtet bei den Baualtersklassen bis 1978 abgezogen worden. Dem liegt die Annahme zu Grunde, dass vornehmlich ältere Gebäude rückgebaut werden [91]. Die Ergebnisse sind in Abbildung 5 dargestellt.

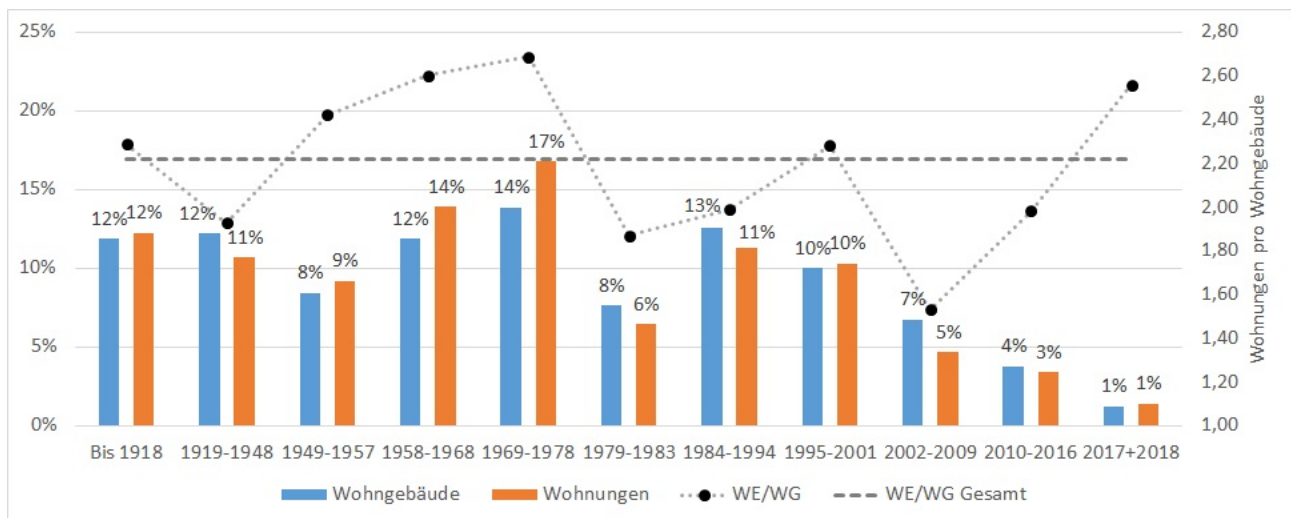


Abbildung 5: Prozentuale Aufteilung deutscher Gebäudebestand nach Gebäudealtersklassen für 2018 (eigene Berechnung auf Basis Datenerhebung [36] und Fortschreibung für 2018 durch Daten [51])

Die Aufteilung nach Wohngebäude und Wohnungen muss weiter verfeinert werden, da Wohngebäude und Wohnungsgrößen eine hohe Bandbreite aufweisen. So zählt ein Einfamilienhaus mit 150 m^2 Wohnfläche oder mehr ebenso als eine Wohneinheit bzw. Wohnung wie auch eine Einzimmerwohnung mit gerade mal 30 m^2 oder sogar weniger. Deshalb wird als nächstes eine weitere Aufteilung in Einfamilienhaus/Zweifamilienhaus (EFH/ZFH) und Mehrfamilienhaus (MFH) getroffen. Die prozentualen Anteile können Tabelle 2 entnommen werden.

Tabelle 2: Aufteilung in EFH/ZFH & MFH (Werte aus [42])

	EFH/ZFH	MFH
Wohngebäude	83 %	17 %
Wohnungen	47 %	53 %
Wohnfläche	59 %	41 %

Mit den prozentualen Anteilen in Tabelle 2 kann die Wohnfläche pro Gebäudealtersklasse bestimmt werden. Dabei wurden die unterschiedlichen Verhältnisse von EFH zu MFH in den verschiedenen Baualtersklassen berücksichtigt (vgl. Abbildung 5). Die Gewichtung wird anhand der durchschnittlichen Wohnungen pro Wohngebäude für EFH/ZFH (WE/WG: 1,26) und MFH (WE/WG: 6,91), die sich aus dem Gesamtbestand ergeben, und dem Durchschnitt für die entsprechende Baualtersklasse (BAK) vorgenommen (siehe Gleichung 1).

Beispiel für Anteil (x) EFH in BAK bis 1918 (vgl. WE/WG: 2,29 in Abbildung 5):

$$2,29 = 1,26 * x + 6,91 * (1 - x) \quad (1)$$

Weiterhin wurde berücksichtigt, dass die unterschiedlichen Baualtersklassen unterschiedliche mittlere Wohnungsgrößen haben. Die durchschnittliche Wohnungsgröße der Ein- und Zweifamilienhäuser wuchs beispielsweise von 107 (Baualtersklasse vor 1918) auf 140 m^2 (2010-2018) an (siehe Tabelle 3). Der Trend bei den Mehrfamilienhäusern ist nicht ganz so eindeutig, so sind die durchschnittlichen Wohnungsgrößen zwischenzeitlich auch gesunken und variieren ebenfalls mit der Anzahl der Parteien pro Gebäude. Als anteilmäßig größte Gruppe der MFH wurde die durchschnittliche Wohnungsgröße der Gruppe mit 3-6 Wohneinheiten für die Aufteilung der Wohnfläche auf die Baualtersklassen zugrunde gelegt. Die genutzten durchschnittlichen Wohnungsgrößen sind in Tabelle 3 aufgelistet und basieren auf Angaben in [42]. Dabei wurden die zeitlichen Einteilungen in [42] auf die Altersklassen, wie in Abbildung 5, übertragen. Damit die Unterschiede ersichtlich werden, sind sie ebenfalls in Tabelle 3 aufgelistet.

Aufgrund der Aggregation aller neuen Gebäude in der Baualtersklasse „ab 2010“ in [36] (siehe Abbildung 5), sind dort ebenfalls Gebäude mit dem Baujahr aus 2016 enthalten. Diese müssten bezogen auf die TABULA Webdatenbank eigentlich in der Baualtersklasse 2016+ integriert werden. Somit gibt sich eine Verschiebung von einem Jahr aus der letzten Baualtersklasse (2016+) in die vorletzte (2010-2015), wenn die Gebäudetypologie mit den Ergebnissen verbunden wird. Die Ergebnisse sind in Tabelle 4 dargestellt.

Mit Tabelle 4 ist eine Verteilung der Wohnfläche nach Baualtersklassen und zwei Gebäudetypen, die allerdings nur als Übergruppen zu verstehen sind, gegeben. Diese Übergruppen enthalten je zwei der Gebäudetypen aus der Gebäudetypologie. Eine weitere Aufteilung in energetische Ge-

Tabelle 3: Durchschnittliche Wohnungsgrößen nach Baualtersklassen (linke Seite: genutzte Werte basierend auf [42]; rechte Seite: Werte in [42])

genutzte WFL je WE			WFL je WE in [42]		
Baualter	EFH/ZFH	MFH (3-6 WE)	Baualter	EFH/ZFH	MFH (3-6 WE)
bis 1918	107 m^2	79 m^2	vor 1919	107 m^2	79 m^2
1919-1948	104 m^2	71 m^2	1919-1948	104 m^2	71 m^2
1949-1957	112 m^2	73 m^2	1949-1978	112 m^2	73 m^2
1958-1968	112 m^2	73 m^2	-		
1969-1978	112 m^2	73 m^2	-		
1979-1983	122 m^2	82 m^2	1979-1990	122 m^2	82 m^2
1984-1994	122 m^2	82 m^2	-		
1995-2001	124 m^2	80 m^2	1991-2000	124 m^2	80 m^2
2002-2009	131 m^2	88 m^2	2001-2008	131 m^2	88 m^2
2010-2016	140 m^2	94 m^2	2009+	140 m^2	94 m^2
2017+2018	140 m^2	94 m^2	-		

Tabelle 4: Aufteilung der Wohngebäude, Wohnungen & Wohnfläche des Gebäudebestands 2018 nach Baualtersklassen (eigene Berechnung auf Basis von [36] und [42])

Baualters- klasse	EFH/ZFH			MFH		
	WG	WE	WFL [m^2]	WG	WE	WFL [m^2]
Bis 1918	1.846.485	2.317.789	245.272.270	411.502	2.843.853	207.680.833
1919-1948	2.056.218	2.581.054	265.473.546	277.036	1.914.569	125.658.428
1949-1957	1.269.900	1.594.034	176.565.712	329.508	2.277.197	153.668.818
1958-1968	1.721.364	2.160.731	239.336.840	536.623	3.708.555	250.259.056
1969-1978	1.967.777	2.470.041	273.597.952	666.541	4.606.404	310.847.308
1979-1983	1.293.343	1.623.461	195.881.000	157.325	1.087.257	82.415.386
1984-1994	2.083.092	2.614.788	315.491.085	309.567	2.139.393	162.168.583
1995-2001	1.558.277	1.956.018	239.875.114	344.547	2.381.130	176.090.288
2002-2009	1.218.879	1.529.990	198.221.448	62.230	430.067	34.984.952
2010-2016	624.100	783.398	108.467.888	91.814	634.516	55.135.661
2017+2018	174.735	219.335	30.368.734	52.355	361.821	31.440.096
Summe	15.814.169	19.850.639	2.288.551.590	3.239.047	22.384.763	1.590.349.410

bäudetyphen ist nach Bauweisen oder der Wohnungsanzahl mit den Daten in [36] möglich. Um die zur Verfügung stehenden Gebäudetyphen in der Gebäudetypologie bestmöglich zu nutzen, ist entsprechend eine Aufteilung auf die Gebäudetyphen notwendig. Hier stellt sich die Frage, wie der deutsche Gebäudebestand am besten durch diese Gebäudetyphen modelliert werden kann und damit, welche Gebäudetyphen durch welche repräsentativen Gebäude der Typologie hinsichtlich ihrer Energieverbrauchskennwerte abgebildet werden können. Während sich eine Berücksichtigung der Sonderfälle mangels Informationen schwierig gestaltet, bilden die vier vorhandenen

repräsentativen Gebäudetypen und deren Baualtersklassen eine gute Grundlage für eine energetische Modellierung.

Die Übergruppe der EFH/ZFH enthält neben den in der Typologie enthaltenen EFH und Reihenhäusern (RH) auch ZFH und Doppelhaushälften. Größere ZFH haben durch ihr besseres A/V-Verhältnis geringere thermische Verluste als EFH. Bei Doppelhaushälften entfallen die thermischen Verluste an der Trennwand zwischen den Häuserhälften. Wird das Doppelhaus (DH) nicht als Hälfte, sondern als Ganzes betrachtet, entspricht es einem ZFH. DH und ZFH können somit bei einem Bezug auf die Wohnfläche zusammen betrachtet werden, sofern die Wohnfläche bei gleicher Geometrie vergleichbar ist. Eine DH-Hälfte besitzt im Durchschnitt ein schlechteres A/V-Verhältnis als ein Reihemittelhaus, da nur eine Seite durch das Nachbargebäude bedeckt ist. Daneben entspricht eine DH-Hälfte aber einem Reihenendhaus. Für das Modell wird angenommen, dass DH eine größere Überschneidung mit RH haben, sie werden also im Modell durch die in der TABULA hinterlegten RH modelliert. Sollte der sich ergebende Endenergiebedarf im Modell unter dem der nationalen Energiebilanz liegen, könnte angenommen werden, dass DH besser durch EFHs abgebildet werden und entsprechend darüber im Modell integriert werden.

Bei den MFH werden große MFH wenn möglich auch durch große MFH aus TABULA modelliert. Wenn für die entsprechende Baualtersklasse kein Gebäude in TABULA vorhanden ist, wird stattdessen das Modell für kleine MFH genutzt. Da Modelle für große MFH nur bei den neueren Baualtersklassen fehlen, ist der Unterschied bei den energetischen Kennwerten durch tendenziell höherwertige Außenhüllen geringer. Die Aufteilung des Bestands (Tabelle 4) wird entsprechend Tabelle 5 auf die vier Gebäudetypen und Baualtersklassen durchgeführt.

Tabelle 5: Modellierung verschiedener energetischer Wohngebäudetypen

Energetischer Gebäudetyp	Typologie	Modell
EFH	vorhanden	EFH
DH	nicht vorhanden	RH
RH	vorhanden	RH
kl. MFH	vorhanden	kl. MFH
gr. MFH	teilweise vorhanden	gr. MFH ansonsten kl. MFH

Die Aufteilung der EFH/ZFH wird anhand der Daten in [36] durch die Bauweise getätigt. Die Gruppe der MFH wird durch die Anzahl der Wohnungen aufgeteilt. Dabei werden alle Gebäude ab 13 Wohnungen den großen MFH⁹ zugerechnet. Die Ergebnisse sind in Tabelle 6 dargestellt.

Tabelle 6: Aufteilung der Wohnfläche des Gebäudebestands nach Baualtersklassen & Gebäudetypen für 2018 (eigene Berechnung auf Basis von [36] und [42])

Baualters- klasse	EFH/ZFH		MFH		Einheit
	freistehende EFH	DH & RH	kl. MFH	gr. MFH	
Bis 1918	159.426.975	85.845.294	188.158.835	19.521.998	m^2
1919-1948	172.557.805	92.915.741	113.846.536	11.811.892	m^2
1949-1957	114.767.713	61.767.999	139.223.949	14.444.869	m^2
1958-1968	155.568.946	83.767.894	226.734.704	23.524.351	m^2
1969-1978	177.838.669	95.759.283	281.627.661	29.219.647	m^2
1979-1983	127.322.650	68.558.350	74.668.340	7.747.046	m^2
1984-1994	205.069.205	110.421.880	146.924.736	15.243.847	m^2
1995-2001	155.918.824	83.956.290	159.537.801	16.552.487	m^2
2002-2009	128.843.941	69.377.507	31.696.367	3.288.585	m^2
2010-2016	70.504.127	37.963.761	49.952.909	5.182.752	m^2
2017+2018	19.739.677	10.629.057	28.484.727	2.955.369	m^2
Summe	1.487.558.534	800.993.057	1.440.856.565	149.492.845	m^2
	2.288.551.590		1.590.349.410		m^2
	3.878.901.000				m^2

Somit bedarf es noch der Identifizierung des Modernisierungsstands. In [42] wird der Modernisierungsstand auf Basis der Angaben des IWU auf 30 % aller Altbauten abgeschätzt. In [102] wiederum werden für Deutschland folgende Daten angegeben:

- Unsaniert: 35,9 %
- Teilsaniert: 51,4 %
- Vollsaniert: 4,3 %
- Anteil Neubau: 8,4 %

Was zuerst so aussieht, als wären diese Zahlen nicht vereinbar, lässt sich durch unterschiedliche Bezugsgrößen erklären. Während die 30 % sich nur auf die Altbauten beziehen und gleichzeitig vollsanierte Äquivalente darstellen, beziehen sich die Zahlen in [102] auf den gesamten

⁹Die Aufteilung wurde gewählt, da die Wohnfläche der Gebäudetypen (gr. MFH) in TABULA eine Spannweite von 829-3887 m^2 hat und hierzu die prozentuale Gebäudeeinteilung der MFH (3-6, 7-12 & >12 WE) von mindestens 13 WE bzw. >12 WE am besten übereinstimmt.

Gebäudebestand und teilsanierte Gebäude sind nicht in vollsanierte Äquivalente umgerechnet. Allerdings kann selbst bei den vollsanierten Äquivalenten die Güte der Modernisierung nur geschätzt werden. Wird das Einhalten der Mindestanforderungen vorausgesetzt, können die Mindestanforderungen der letzten Jahre als Untergrenze mit Anteilen höherwertiger Ausführungen vorausgesetzt werden. Gegebenenfalls kann ein energetischer Abgleich mit der nationalen Endenergiebilanz weitergehende Erkenntnisse zum Modernisierungsstand liefern.

2.2 Wärmeversorgungsanlagen & Energieträger

Der Endenergiebedarf für Wärme (Raumwärme & Warmwasser) des Gebäudebestands wird maßgeblich von der Gebäudeanzahl, den Gebäudearten, der energetischen Güte der Gebäude und der Anzahl der Bewohner bestimmt. Die Anzahl der Bewohner ist dabei mitunter der bestimmende Faktor für den Warmwasserverbrauch. Um die Vision und das Ziel des nahezu klimaneutralen Gebäudebestands im Jahr 2050 zu verwirklichen und zu erreichen, sind mehr als nur Maßnahmen zur Reduzierung des Endenergiebedarfs notwendig. Denn nur durch die Reduzierung des Endenergiebedarfs ist dieses Ziel kaum realistisch möglich, ohne starke Komforteinbußen für die Bewohner hinnehmen zu müssen. Entsprechend ist Energieeffizienz auch nur ein Teil der Strategie auf dem Weg zur Klimaneutralität (siehe S.4 [24]). Der zweite Teil der Strategie ist die Erhöhung des Anteils erneuerbarer Energien (siehe S.4 [24]), also die weiterhin benötigte Energie umweltfreundlich bereitzustellen. Für die umweltfreundliche Bereitstellung der notwendigen Energie ist eine entsprechende Veränderung der Wärmeversorgungsinfrastruktur des Gebäudebestands notwendig. Über diese Infrastruktur und deren Versorgung mit leitungsgebundenen und nicht leitungsgebundenen Energien und Energieträgern wird der Primärenergiebedarf und die CO_2 -Emissionen des Gebäudebestands bestimmt.

Je nach Art der Modellierung ist es notwendig die identifizierten Bestandszahlen (Abschnitt 2.1) und den Endenergiebedarf der Gebäude mit den entsprechenden Wärmeversorgungsanlagen zu verbinden. In [36] werden die Aufteilung von Wärmeversorgungsanlagen nach Hauptenergieträger für WG allgemein (siehe Aufteilung Hauptenergieträger von WG in Tabelle 7) und bezogen auf EFH und MFH angegeben.

Tabelle 7: Aufteilung der Hauptenergieträger in Wohngebäuden (Quelle: [36])

	Fernwärme	Gas	Heizöl	Holz/Biomasse	Strom	Kohle
Anteil WG	6,4 %	52,5 %	27,5 %	5,3 %	6,4 %	0,3 %

Weiterhin wird dort eine Aufteilung für drei Baualtersklassen gelistet. Durch die Verbindung der Tabellen aus [36] mit den Gebäudebestandszahlen in Abschnitt 2.1, kann eine Aufteilung für EFH und MFH mit einer Gewichtung nach Baualtersklassen erstellt werden. Die Ergebnistabellen (Tabellen 8 & 9) sind nachfolgend dargestellt.

Tabelle 8: Aufteilung der Haupt-Energieträger für Beheizung in EFH nach Baualter des Gebäudes (eigene Berechnung auf Basis [36])

BAK	Fernwärme	Gas	Heizöl	Holz/Biom.	Strom	Kohle	Summe
bis 1918	0,48 %	5,98 %	4,05 %	0,77 %	0,56 %	0,05 %	11,89 %
1919-1948	0,50 %	6,18 %	4,18 %	0,80 %	0,58 %	0,06 %	12,29 %
1949-1957	0,34 %	4,24 %	2,87 %	0,55 %	0,39 %	0,04 %	8,42 %
1958-1968	0,48 %	5,98 %	4,05 %	0,77 %	0,56 %	0,05 %	11,89 %
1969-1978	0,56 %	6,98 %	4,72 %	0,90 %	0,65 %	0,06 %	13,88 %
1979-1983	0,27 %	4,52 %	1,98 %	0,38 %	0,44 %	0,01 %	7,59 %
1984-1994	0,45 %	7,45 %	3,27 %	0,62 %	0,73 %	0,01 %	12,53 %
1995-2001	0,36 %	5,93 %	2,60 %	0,49 %	0,58 %	0,01 %	9,96 %
2002-2009	0,24 %	3,99 %	1,75 %	0,33 %	0,39 %	0,01 %	6,71 %
2010-2016	0,16 %	1,63 %	0,03 %	0,30 %	1,54 %	0,00 %	3,67 %
2017+2018	0,05 %	0,52 %	0,01 %	0,10 %	0,49 %	0,00 %	1,16 %
Summe	3,90 %	53,90 %	29,50 %	6,00 %	6,90 %	0,30 %	100,00 %

In [36] wird für die Baualtersgruppe 1979-2009 ein Anteil von 0,1 % für Gebäude mit Kohle als Energieträger angegeben. Diese Wärmeversorgungsanlagen sind wahrscheinlich hauptsächlich in den älteren Gebäuden dieser Gruppe vertreten. Allerdings ist eine weitere Aufteilung nicht möglich und so sind in den Ergebnistabellen (Tabellen 8 & 9) auch für Gebäude aus den Jahren nach 1994 Anteile größer Null für Kohle angegeben, die aber zahlenmäßig bedeutungslos sind.

Die Verteilungen in den Tabellen 8 und 9 zeigen die Anteile der Gebäude im deutschen Wohngebäudebestand die mit dem entsprechenden Energieträger als Hauptenergieträger beheizt werden. Dies erlaubt einen gewissen Rückschluss auf die benötigte Primärenergie und entstehenden THG-Emissionen. Allerdings ergibt sich durch den Bezug auf Gebäude eine Unsicherheit. Da die Verteilung sich auf Wohngebäude bezieht, kann die Verteilung bezogen auf Endenergiemengen abweichen, beispielsweise wenn Fernwärme hauptsächlich in MFH mit einem absolut

Tabelle 9: Aufteilung der Haupt-Energieträger für Beheizung in MFH nach Baualter des Gebäudes (eigene Berechnung auf Basis [36])

BAK	Fernwärme	Gas	Heizöl	Holz/Biom.	Strom	Kohle	Summe
bis 1918	2,30 %	6,45 %	2,38 %	0,28 %	0,31 %	0,07 %	11,80 %
1919-1948	2,37 %	6,66 %	2,46 %	0,29 %	0,33 %	0,07 %	12,19 %
1949-1957	1,63 %	4,57 %	1,69 %	0,20 %	0,22 %	0,05 %	8,36 %
1958-1968	2,30 %	6,45 %	2,38 %	0,28 %	0,31 %	0,07 %	11,80 %
1969-1978	2,68 %	7,52 %	2,78 %	0,33 %	0,37 %	0,08 %	13,76 %
1979-1983	1,30 %	4,87 %	1,17 %	0,14 %	0,25 %	0,01 %	7,73 %
1984-1994	2,14 %	8,03 %	1,93 %	0,23 %	0,41 %	0,02 %	12,75 %
1995-2001	1,70 %	6,39 %	1,53 %	0,18 %	0,33 %	0,01 %	10,14 %
2002-2009	1,15 %	4,30 %	1,03 %	0,12 %	0,22 %	0,01 %	6,83 %
2010-2016	0,77 %	1,76 %	0,02 %	0,11 %	0,87 %	0,00 %	3,53 %
2017+2018	0,24 %	0,56 %	0,01 %	0,04 %	0,28 %	0,00 %	1,12 %
Summe	18,58 %	57,54 %	17,38 %	2,20 %	3,90 %	0,40 %	100,00 %

höheren Wärmebedarf installiert ist. Daneben beziehen sich die Werte auf die Hauptenergieträger und berücksichtigen entsprechend keine unterstützende Systeme wie Solarthermie oder Durchlauferhitzer für Warmwasser.

Um beurteilen zu können, ob die Verteilung bezogen auf die Wohngebäude mit einer Verteilung bezogen auf die Energiemengen vergleichbar ist, werden die Endenergiebedarfe privater Haushalte nach Anwendungsbereichen für 2018 betrachtet. In Tabelle 10 sind die prozentualen Anteile der Energieträger am Endenergieverbrauch für Raumwärme und Warmwasser der privaten Haushalte angegeben.

Tabelle 10: Aufteilung der Deckungsanteile der Endenergieverbräuche für Raumwärme (RW) und Warmwasser (WW) von PHH in 2018 ([25])

	Fernwärme	Gas	Heizöl	Erneuerbare	Strom	Sonstige
Anteil für RW & WW	9,25 %	47,27 %	21,78 %	16,42 %	4,22 %	1,07 %

Der Vergleich der Tabellen 8 und 9 bzw. 7 mit Tabelle 10 zeigt eine Korrelation, die in einigen Punkten nicht unerwartet abweicht:

Holz/Biomasse & Erneuerbare: Dieser Punkt unterscheidet sich wesentlich und hat entsprechend Auswirkungen auf die anderen Anteile. Die unterschiedlichen Bezeichnungen geben

dabei bereits einen Hinweis auf einen Grund. Während in Tabelle 10 unter der Bezeichnung „Erneuerbare“ Biomasse und erneuerbare Abfälle, Geothermie, Solarthermie und Umweltwärme zusammengefasst sind, sind in Tabelle 7 nur Holz und Biomasse aufgeführt. Geothermie und Umweltwärme werden dabei in Tabelle 7 als Energiequellen für Wärmepumpen nicht berücksichtigt, da Strom in diesem Fall als Hauptenergieträger angenommen wird. Solarthermie wiederum wird in der Regel nur als unterstützendes Element neben einem anderen Hauptenergieträger genutzt und entfällt in Tabelle 7 ebenfalls gänzlich. Da nicht alle Endenergiemengen durch die Hauptenergieträger gedeckt werden, fallen die Anteile in Tabelle 10, abgesehen von den Erneuerbaren in denen weitere Energiequellen berücksichtigt sind, tendenziell geringer aus.

Fernwärme: Die Fernwärme hat einen größeren Anteil bei der Deckung des Endenergieverbrauchs, als der Anteil von Wärmeversorgungsanlagen vermuten lässt. Gleichzeitig zeigt der Vergleich zwischen den Tabellen 8 und 9, dass Fernwärme hauptsächlich in größeren MFH mit entsprechend höherem absoluten Verbrauch genutzt wird. Deshalb ist der Anteil in Tabelle 10 erwartungsgemäß größer als in Tabelle 7.

Gas: Der Anteil für Gas am Endenergieverbrauch ist geringer als der Anteil an den Anlagen. Das lässt darauf schließen, dass die Anlagen im Durchschnitt kleiner sind, in bereits besser gedämmten Gebäuden eingesetzt werden oder zusätzlich durch Durchlauferhitzer, Kamine oder Solarthermie unterstützt werden.

Heizöl: Der Anteil für Heizöl am Endenergieverbrauch ist, wie beim Gas, geringer als der Anteil an den Anlagen. Durch höhere Anteile bei EFH als bei MFH wird dies zusätzlich verstärkt.

Sonstige & Kohle: Sonstige in Tabelle 10 enthält nur Abwärme aus IKT die für Raumwärme genutzt werden kann. Kohle wird in Tabelle 10 nicht aufgeführt auch wenn es nach [36] noch einen sehr geringen Anteil von Wärmeversorgungsanlagen auf Basis von Kohle geben soll.

Für die Modellierung könnte entweder eine aggregierte Variante bezogen auf den Endenergieverbrauch wie in Tabelle 10 genutzt werden oder die Aufteilung auf die Gebäude (vgl. Tabellen 8 und 9, welche eine Modellierung auf Gebäudeebene, gekoppelt an den Modernisierungsvorgang, ermöglicht. Letzteres sollte mit einer Kalibrierung hinsichtlich der nationalen Endenergiebilanz

einhergehen, um aussagekräftige THG- und Primärenergiebilanzen erstellen zu können.

2.3 Entwicklungen seit 1990

Mit den dargestellten Informationen liegen bereits vielfältige Informationen vor, um den Wohngebäudebestand im derzeitigen Zustand in einem Modell zu integrieren. Für die Modellierung der weiteren Entwicklung der wichtigsten Parameter des Wohngebäudebestands ist ein Rückblick sinnvoll, um anhand der vergangenen die zukünftige Entwicklung modellieren zu können. Um also eine Einschätzung zu Einsparpotenzialen für 2050 geben zu können, sollen entscheidende Parameter des Wohngebäudebestands endogen anhand vergangener Entwicklungen modelliert und in den Simulationen durch Variation der Rahmenbedingungen (z.B. wirtschaftlich) oder auch direkt exogen beeinflusst werden.

In Tabelle 11 ist eine Übersicht der Entwicklungen wichtiger Kennzahlen für den Wohngebäudebestand in Deutschland seit 1995 im Vergleich zur Bevölkerungsentwicklung aufgelistet.

2.3.1 Bevölkerungsentwicklung

Die Bevölkerungsentwicklung ist ein Grundindikator für die Nachfrage nach Wohnraum. Entsprechend sind Prognosen für die Bevölkerungsentwicklung zur Ableitung der zu erwartenden Auswirkungen auf den Wohnungsmarkt in eine langfristige Betrachtung zu integrieren.

Der Rückblick auf die Bevölkerungsentwicklung soll nicht dazu dienen eine eigene Prognose für die Bevölkerungsentwicklung abzugeben. Stattdessen stellt sich die Frage, wie die Bevölkerungsentwicklung in den Simulationen dargestellt und der Einfluss der Bevölkerungsentwicklung auf den Wohnungsmarkt eingebunden wird. Dieser ist auch Gegenstand von Untersuchungen (siehe bspw. [68], [92] oder [41]). Die Verbindung ist allerdings komplex und wird von zahlreichen weiteren Entwicklungen wie Altersstruktur, Fertilität, Haushaltsgründungen, Einkommen und Bildungsstand beeinflusst. Diese Faktoren sowie weitere wichtige Faktoren in Gänze zu betrachten ist nicht zielführend, da es entsprechend aufwändig ist, ein besseres Ergebnis fraglich und zudem nicht Hauptgegenstand dieser Untersuchung.

Tabelle 11: Entwicklungen im deutschen Wohngebäudebestand 1994-2018 (Wohngebäude, Wohnungen & Wohnfläche; die Auffälligkeiten in 2010 sind aufgrund der Umstellung auf Zahlen des Zensus 2011) [51] & [53]

	1995	1996	1997	1998	1999	2000
Bevölkerung	81.817.499	82.012.162	82.057.379	82.037.011	82.163.475	82.259.540
Wohngebäude	15.732.422	15.924.303	16.137.329	16.352.889	16.583.053	16.802.259
Delta	-	+191.881	+213.026	+215.560	+230.164	+219.206
Wohnungen	35.954.317	36.492.323	37.050.369	37.529.144	37.984.298	38.383.645
Delta	-	+538.006	+558.046	+478.775	+455.154	+399.347
WFL [in 1000m²]	3.005.457	3.054.302	3.106.250	3.153.846	3.201.599	3.245.487
Delta	-	+48.845	+51.948	+47.596	+47.753	+43.888
WFL/Person	36,73	37,24	37,85	38,44	38,97	39,45
	2001	2002	2003	2004	2005	2006
Bevölkerung	82.440.309	82.536.680	82.531.671	82.500.849	82.437.995	82.314.906
Wohngebäude	16.977.662	17.139.079	17.293.678	17.458.670	17.599.942	17.742.413
Delta	+175.403	+161.417	+154.499	+164.992	+141.272	+142.471
Wohnungen	38.681.801	38.924.836	39.141.543	39.362.266	39.551.203	39.753.733
Delta	+298.156	+243.035	+216.707	+220.723	+188.937	+202.530
WFL [in 1000m²]	3.280.295	3.310.205	3.339.229	3.368.920	3.394.782	3.421.384
Delta	+34.808	+29.910	+29.024	+29.691	+25.862	+26.602
WFL/Person	39,79	40,11	40,46	40,83	41,18	41,56
	2007	2008	2009	2010	2011	2012
Bevölkerung	82.217.837	82.002.356	81.802.257	81.751.602	80.327.900	80.523.746
Wohngebäude	17.859.112	17.949.803	18.029.257	18.234.580	18.323.246	18.420.645
Delta	+116.699	+90.691	+79.454	+205.323	+88.666	+97.399
Wohnungen	39.918.192	40.057.282	40.183.563	40.479.270	40.630.302	40.805.805
Delta	+164.459	+139.090	+126.281	+295.707	+151.032	+175.503
WFL [in 1000m²]	3.443.790	3.462.334	3.479.042	3.680.626	3.699.478	3.720.883
Delta	+22.406	+18.544	+16.708	+201.584	+18.852	+21.405
WFL/Person	41,89	42,22	42,53	45,02	46,05	46,21
	2013	2014	2015	2016	2017	2018
Bevölkerung	80.767.463	81.197.537	82.175.684	82.521.653	82.792.351	83.019.213
Wohngebäude	18.521.263	18.628.038	18.731.913	18.839.837	18.947.981	19.053.216
Delta	+100.618	+106.775	+103.875	+107.924	+108.144	+105.235
Wohnungen	40.995.141	41.221.210	41.446.269	41.703.347	41.968.066	42.235.402
Delta	+189.336	+226.069	+225.059	+257.078	+264.719	+267.336
WFL [in 1000m²]	3.743.543	3.769.376	3.794.976	3.822.507	3.850.742	3.878.901
Delta	+22.660	+25.833	+25.600	+27.531	+28.235	+28.159
WFL/Person	46,35	46,42	46,18	46,32	46,51	46,72

Wird die Nachfrage nach Wohnraum im Vergleich zur Bevölkerungsentwicklung in Deutschland der vergangenen Jahre betrachtet, so ist die Menge der Wohnfläche um 30 % von 3 Mrd. m^2 in 1995 auf 3,9 Mrd. m^2 in 2018 gestiegen (vgl. Tabelle 11). Zwar ist auch die Bevölkerung in diesem Zeitraum gewachsen, aber nicht annähernd in dem Verhältnis wie die Wohnfläche. Dies zeigt sich auch in der Wohnfläche pro Person, die in gleichem Zeitraum von durchschnittlich 36,7 auf 46,7 m^2 pro Person (+27 %) angewachsen ist.

In Tabelle 11 zeigt sich, dass die Bevölkerung ab 2003 zunehmend rückläufig ist. Seit 2012 ist sie indes wieder gestiegen und hat den vormaligen Höchstwert aus 2003 in 2016 überschritten. Aus dem Auf und Ab der letzten Jahrzehnte einen Trend abzuleiten ist problematisch. Dies ist der Fall, da die Entwicklung nicht erst seit 2012 maßgeblich von der Zuwanderung beeinflusst wird. Der Wanderungssaldo variiert aufgrund national- und welt-politischer Entscheidungen sowie Ereignissen natürlicher und nicht natürlicher Art sehr stark in der Intensität. Eine gute Prognose für die Bevölkerungsentwicklung zu treffen ist entsprechend schwierig und jede Prognose kritisch zu betrachten. Die Schwankungen der Bevölkerungszahlen der letzten Jahre haben sich nahezu negiert und führten innerhalb der 24 Jahre von 1995 auf 2018 zu einem positiven Bevölkerungswachstum von insgesamt 1,5 %. Damit kann das Bevölkerungswachstum allerdings kaum Haupttreiber der stetig wachsenden Menge an Wohngebäuden, Wohnungen und Wohnfläche in den letzten Jahren sein.

Während ein Einfluss der Bevölkerungszahlen auf die Wohnraumnachfrage offensichtlich ist, dieser allerdings bei nahezu gleichbleibenden Zahlen kaum zutage tritt, deutet der steigende Indikator der Wohnfläche pro Person auf weitere Faktoren hin. Wichtigster Faktor ist die Verkleinerung der mittleren Haushaltsgröße durch Remanenzeffekt und steigende Anzahlen von Single-Haushalten [125]. Letztere weisen im Durchschnitt eine deutliche größere Wohnfläche pro Person auf. Die steigende Anzahl von Single-Haushalten ist kulturell und gesellschaftlich geprägt und schwer vorauszusagen. Eine weitere Zunahme der Wohnfläche pro Person, auch aufgrund des Remanenzeffektes, ist aber sehr wahrscheinlich. Gründe für diese Einschätzung sind unter anderem:

1. Steigende Lebenserwartung und damit längere Phasen von allein Lebenden und zum Teil selbstversorgenden Senioren, die weiterhin in bestehenden (zumeist für die Anzahl Personen großen) Wohnungen und Häusern leben.

2. Dies wird verstärkt, da die geburtenstarken Jahrgänge der Nachkriegszeit zunehmend ins Rentenalter kommen.

Gleichzeitig darf nicht vergessen werden, dass auch Gegenmaßnahmen gegen den Remanenzeffekt zu erwarten und seitens der Senioren aufgrund Vereinsamung ggf. gerne angenommen werden. Der zweite Punkt ist auch zeitlich beschränkt, da innerhalb des Betrachtungszeitraums bis 2050 ein starker Rückgang der geburtenstarken Jahrgänge zu erwarten ist. Dementsprechend ist ein erhöhter Einfluss des Remanenzeffektes in naher Zukunft zu erwarten und ab Mitte bzw. gegen Ende des Betrachtungszeitraumes als rückläufig anzunehmen. Auch die Autorin der Analyse [125] kommt zu dem Schluss, dass der steigende Wohnflächenverbrauch pro Person abgeschwächt weitergehen wird.

Für die Modellierung des Einflusses der Bevölkerungszahlen auf die Wohnraumnachfrage werden folgende Punkte festgehalten:

- Die Bevölkerungszahlen werden anhand von Prognosen in die Modellierung integriert
- Die Bevölkerungszahlen werden vereinfacht direkt in Verbindung mit der Wohnraumnachfrage gebracht. D.h. steigende Zahlen führen zu steigender Wohnraumnachfrage und umgekehrt.
- Weitere Effekte, die rückblickend für steigende Wohnflächenbedarfe pro Person gesorgt haben, können nicht vernachlässigt werden. Es ist mit weiterhin steigender Wohnfläche pro Person im Betrachtungszeitraum zu rechnen.

2.3.2 Wohngebäude, Wohnungen & Wohnfläche

Die Wohnfläche ist ein zentrales Element der Modellierung und ein robusterer Indikator für die energetische Beschaffenheit und Größe des Wohngebäudebestands als Gebäude- und Wohnungszahlen, die in der Größe stark variieren.

Es stellt sich die Frage, ob es Muster als Folge äußerer Umstände gibt, deren erneutes Auftreten bei einer Fortschreibung von Wohngebäude- und Wohnungszahlen oder der Wohnfläche zu erwarten und folglich zu berücksichtigen sind. Um die weitere Entwicklung dieser Parameter

abschätzen zu können, werden die vergangenen Entwicklungen der Gebäudezahlen, Anzahl der Wohnungen und der Wohnfläche untersucht.

Anzahl Wohngebäude

Die Anzahl der Wohngebäude ist vor der Jahrtausendwende wesentlich schneller gestiegen. Danach ist ein Rückgang des Wachstums auf ca. 100.000 Gebäude pro Jahr zu verzeichnen und somit das jährliche Delta nicht halb so groß wie im Durchschnitt vor der Jahrtausendwende (ca. 214.000 WG pro Jahr). Seit 2011 steigt der jährliche Zubau wieder leicht. Während die hohen Zubauraten vor der Jahrtausendwende ein Resultat des Baubooms, ausgelöst durch die Wiedervereinigung, sind [40], ist der leicht gestiegene Zubau der letzten Jahre dem erhöhten Bedarf aufgrund des Zuwachses um 2,7 Millionen Einwohner innerhalb von sieben Jahren zuzuschreiben (vgl. Tabelle 11). Denn damit ist die Bevölkerung in diesem Zeitraum wesentlich gestiegen, anstatt wie erwartet geschrumpft, und als Folge dieser Entwicklung sind die Mieten und die Nachfrage gestiegen [40].

Wohnungen

Die Anzahl der Wohnungen verhält sich auf den ersten Blick annähernd proportional zu dem Zubau von Gebäuden. Wie auch bei den Gebäuden sinkt die Zubaurate der Wohnungen bis zum Tiefpunkt in 2009 (vgl. Tabelle 11). Danach steigt die Zubaurate wieder leicht an. Wird die Anzahl der Wohnungen auf die Anzahl Wohngebäude bezogen, werden wesentliche Unterschiede in den Jahren erkennbar.

In Abbildung 6 sind die Verhältnisse von Wohnungen pro Wohngebäude und Wohnfläche pro Wohnung für das Saldo der Wohnungen und Wohngebäude in den Jahren 1995 bis 2018 dargestellt. Zum Vergleich ist auch das Verhältnis der Anzahl von Wohnungen pro Wohngebäude für den gesamten Bestand enthalten. Es zeigt sich, dass in den Jahren mit geringerer Bautätigkeit die Anzahl der Wohnungen pro Gebäude wesentlich kleiner ist. Am Tiefpunkt in den Jahren 2004 und 2005 waren es nur 1,34 Wohnungen pro Wohngebäude, der Wert liegt also nur etwas über der durchschnittlichen Anzahl Wohnungen pro Wohngebäude der EFH, ZFH, RH und DH (1,26, vgl. Tabelle 4). Daraus lässt sich die These ableiten, dass in Zeiten geringer Wohnraumnachfrage bzw. Bautätigkeit hauptsächlich Gebäude vom Typ Ein- & Zweifamilienhaus (EZFH) gebaut werden bzw. die Nachfrage nach EZFH bleibt relativ konstant. Dies wird auch

von der durchschnittlichen Wohnfläche pro Wohnung mit 135 m^2 (2004) und 137 m^2 (2005) untermauert, da dieser Wert eher einem EFH als einer Wohnung in einem MFH entspricht.

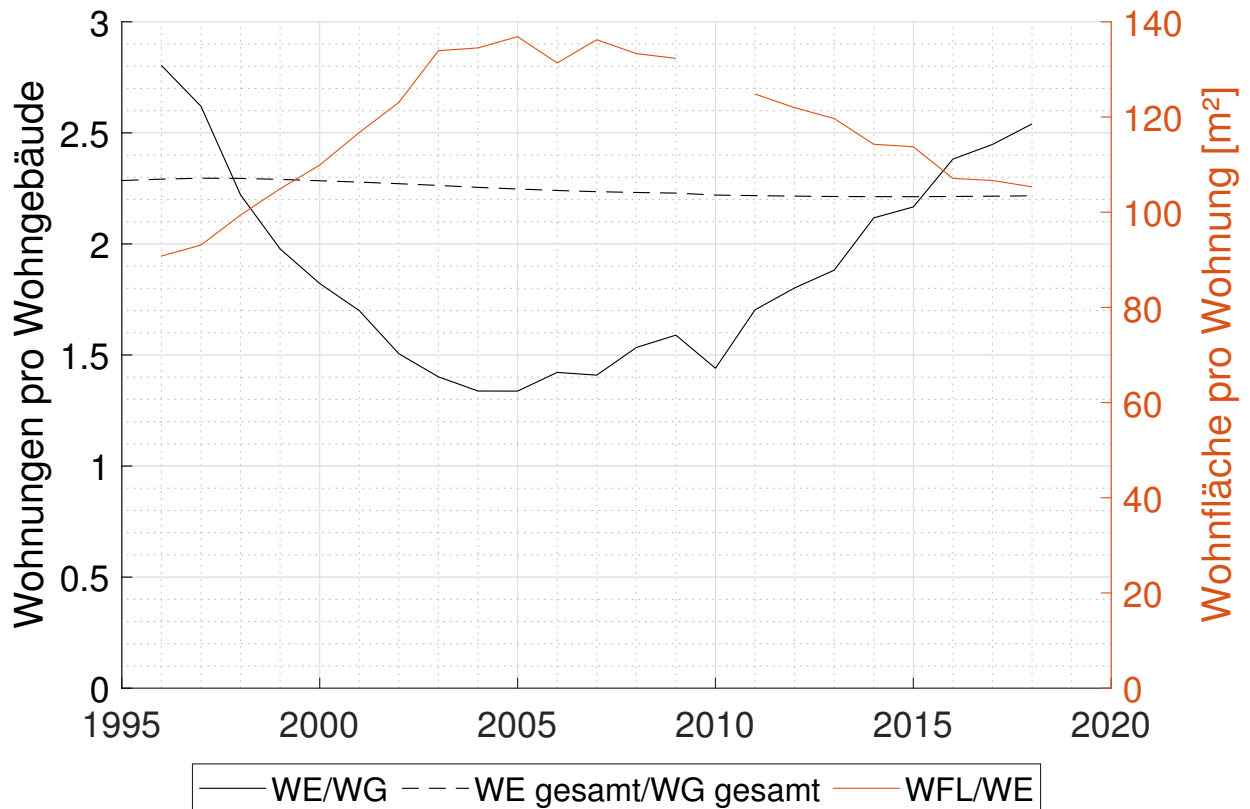


Abbildung 6: Anzahl Wohnungen pro Wohngebäude & WFL pro Wohnung 1995-2018; Δ Werte in 2010 aufgrund statistischer Anpassungen nicht repräsentativ, als Resultat WFL/WE 2010 außerhalb Skala mit $682 \text{ m}^2/\text{WE}$) (eigene Darstellung auf Basis [51])

Neben dem hohen Verhältnis von EZFH zu MFH verbirgt sich ein weiterer Effekt in den Zahlen in Abbildung 6. Da das Verhältnis jeweils aus dem Saldo berechnet ist, sind neben den Neubauten auch Abgänge enthalten. Demnach kann das Verhältnis von Wohnungen pro Wohngebäude auch durch ein vermehrten Abgang von MFH reduziert werden und theoretisch sogar unter eine Wohnung pro Wohngebäude sinken. Die Anzahl der Rückbauten ist zumeist im Bereich von einem Zehntel der Zahlen von Neubauten und damit vergleichsweise gering. Die Jahre 2001 bis 2010 waren allerdings durch eine Verdopplung der Abgänge von MFH geprägt [42]. Ein Großteil dieser Abgänge waren dabei aufgrund der sinkenden Bevölkerungszahlen und relativ einfacher Gebäudesubstanz in den neuen Bundesländern auf diese beschränkt [40].

In Abbildung 7 ist das Verhältnis von fertiggestellten Wohnungen in Wohngebäuden mit 1-2 zu Wohngebäuden mit 3+ Wohnungen dargestellt. Es zeigt sich, dass der Anteil der Ein- und Zweifamilienhäuser tatsächlich ab 1997 stark steigt. In 1997 war das Verhältnis der fertiggestellten Wohnungen in Ein- und Zweifamilienhäusern zu Wohnungen in MFH 0,74 und ist auf ein Maximum von 2,55 in 2004 gestiegen. Danach ist der Wert wieder kontinuierlich gesunken und liegt seit 2015 unter 1. Entsprechend werden derzeit mehr neue Wohnungen in MFH als in EZFH fertiggestellt.

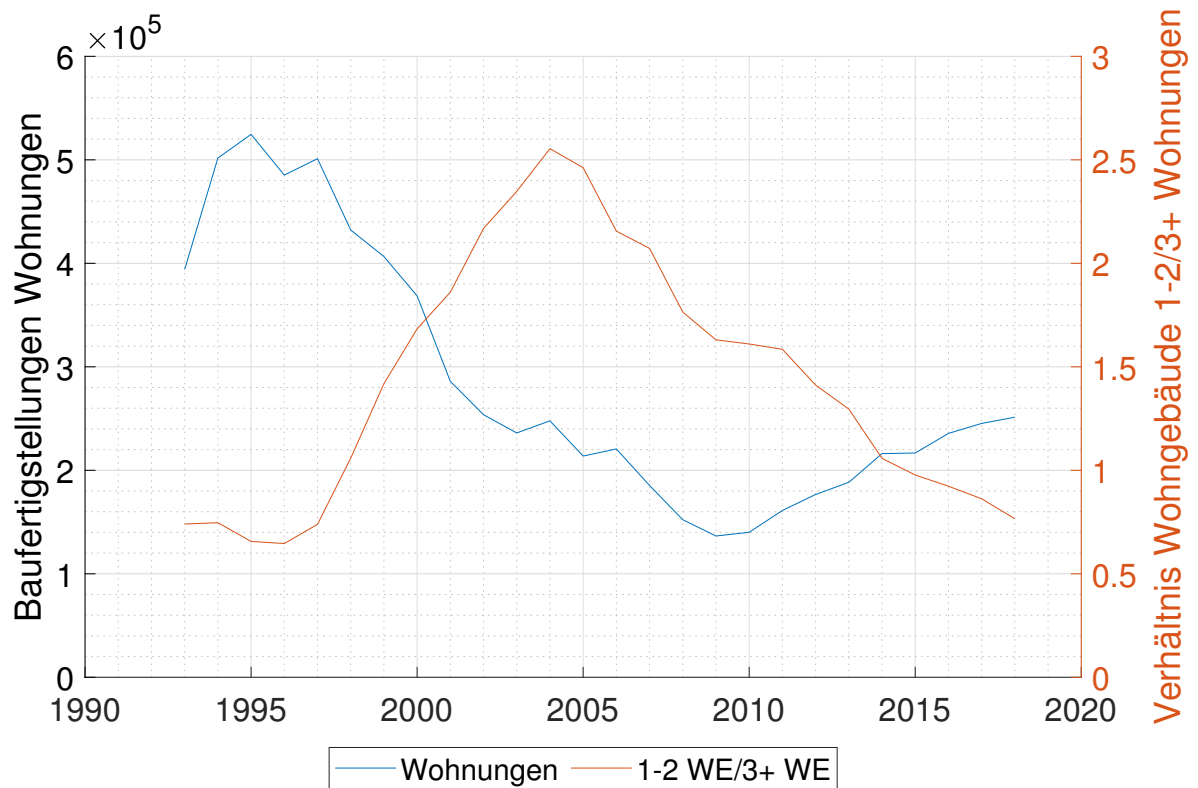


Abbildung 7: Wohnungs-Baufertigstellungen und Verhältnis EFH zu MFH 1993-2018; ohne Wohnungen in Nichtwohngebäuden [49]

Wohnfläche

In Abbildung 8 sind die Entwicklungen der Wohnfläche und der Bevölkerungszahlen in Deutschland von 1995 bis 2018 dargestellt. Die Bevölkerungszahlen sind im gesamten Zeitraum kumuliert um 1,5 % gestiegen. Die tendenziell rückläufigen Bevölkerungszahlen wurden dabei durch erhöhte Zuwanderung in den Jahren 2011 bis 2018 ausgeglichen. Im Vergleich dazu ist die

Wohnfläche stetig gestiegen. Während die Zuwachsraten für die Wohnfläche vor der Jahrtausendwende zum Teil ein Maximum von 1,67 % pro Jahr erreichten, sind sie danach kontinuierlich bis zu einem Minimum von 0,48 % pro Jahr in 2009 gesunken. Die Steigerung um 5,5 % von 2009 auf 2010 wurde dabei vernachlässigt, da sie auf statistischen Änderungen beruht (Umstellung auf Zensus 2011, siehe Hinweise in [51] und [42]).

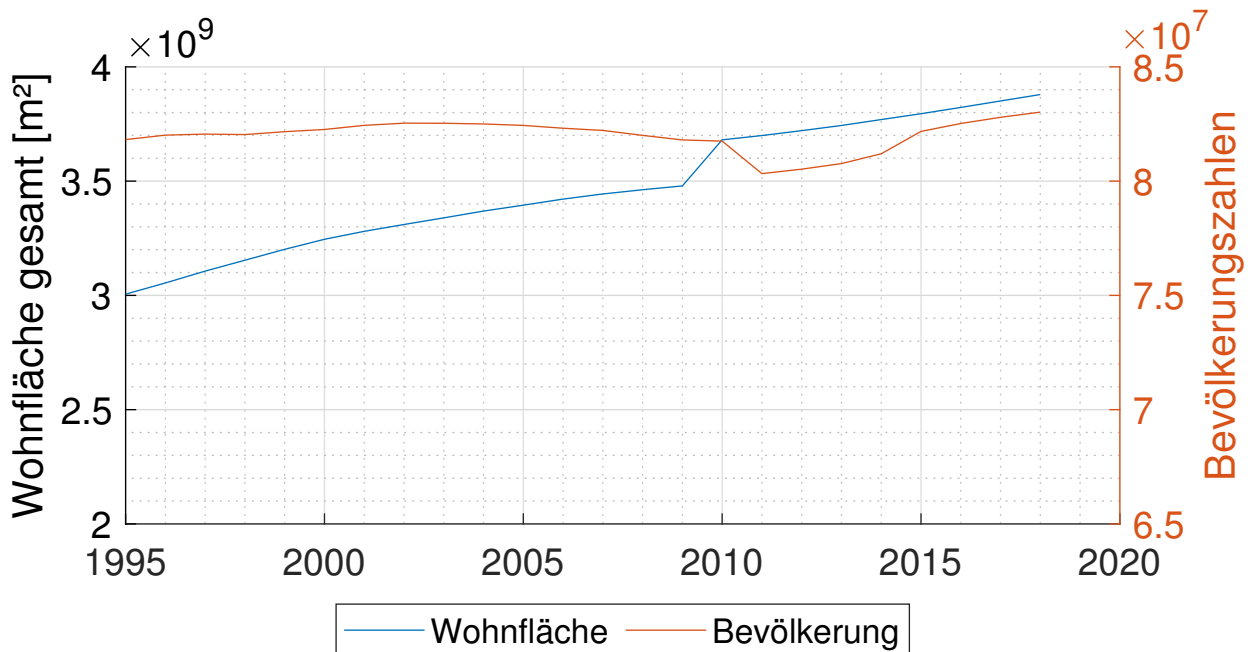


Abbildung 8: Vergleich der Gesamtwohnfläche zur Bevölkerungsentwicklung 1995-2018 [51]

Auf Anheb ist höchstens ein Zusammenhang zwischen der Bevölkerungsentwicklung und der Wohnfläche zu erahnen. Deshalb werden im Folgenden der betrachtete Zeitraum in drei Phasen eingeteilt und die entsprechenden Merkmale und Effekte in diesen Phasen zusammengefasst. Die Einteilung der Phasen orientiert sich am Trend der Bevölkerungsentwicklung.

Phase I (1995-2002): geringfügig steigende Bevölkerungszahlen:

Effekte & Merkmale:

- Bauboom durch die Wiedervereinigung
- Anfangs hoher Anteil MFH bei Neubauten

Tendenzen:

- Durchschnittlicher Zuwachs der Wohnfläche pro Person (1,31 %/a)
- Sinkende Zahlen fertiggestellter neuer Wohngebäude, Wohnungen und Wohnfläche
- Steigender Anteil EFH bei Neubauten, Verhältnis EFH/MFH von 0,6 steigend auf 2,2
- Zunehmender Rückbau von MFHs aufgrund lokal rückläufiger Bevölkerungszahlen in neuen Bundesländern

Phase II (2002-2011): zunehmend rückläufige Bevölkerungszahlen

Effekte & Merkmale:

- Höchster durchschnittlicher Zuwachs der Wohnfläche pro Person unter Einschluss der Jahre mit statistischer Anpassung (1,65 %/a, ohne 2010 1,08 %/a, ohne 2010 & 2011 0,87 %/a)
- Verhältnis neue Wohnungen in EFH zu MFH immer $>1,5$
- 2004 geringster Anteil MFHs bei Neubauten mit Wohnungsverhältnis $>2,5$
- Erhöhter Rückbau von MFHs in den neuen Bundesländern

Tendenzen:

- Wesentlich geringere Anzahl von Neubauten
- Sehr hoher Anteil von EFHs bei Neubauten
- Sinkende Zuwachsraten bei Wohngebäuden, Wohnungen und Wohnfläche

Phase III (2011-2018): steigende Bevölkerungszahlen

Effekte & Merkmale:

- Durchschnittlich geringster Zuwachs der Wohnfläche pro Person (0,21 %/a); 2015 erstes Jahr mit negativer Veränderung (-0,52 %/a) der Wohnfläche pro Person
- Hohe Zuwanderung mit Höhepunkt 2015

Tendenzen:

- Steigende Anzahl von Neubauten
- Steigender Anteil von MFHs bei Neubauten
- Steigende Zuwachsraten der Bevölkerungszahlen bis zum Höhepunkt in 2015 (1,19 %/a); danach rückläufig auf 0,27 %/a in 2018

Durch die Aufteilung in die Phasen fallen drei Punkte auf:

1. Bei geringem Bevölkerungswachstum und sinkenden Bevölkerungszahlen sinkt die allgemeine Bautätigkeit, der Anteil der EFHs an den Neubauten steigt und es werden vermehrt MFHs zurückgebaut.
2. Bei wachsender Bevölkerung zieht die allgemeine Bautätigkeit verzögert an und der Anteil der MFHs an den Neubauten steigt.
3. Die Steigerung der Wohnfläche pro Person fällt bei Bevölkerungswachstum signifikant kleiner aus als bei sinkenden oder nahezu konstanten Bevölkerungszahlen.

Dass eine Verallgemeinerung dieser Punkte möglich ist, kann aufgrund des kurzen Betrachtungszeitraums, der national aggregierten Zahlen und ohne Vergleich mit anderen Ländern oder Untersuchung auf lokal granularer Ebene, bezweifelt werden. Von weiteren Untersuchungen wird an dieser Stelle aber abgesehen und stattdessen der kausale Hintergrund interpretiert.

Dass bei **geringem Bevölkerungswachstum** und sinkenden Bevölkerungszahlen die Bautätigkeit aufgrund sinkender Nachfrage nachlässt, ist verständlich. Weiterhin ist es nachvollziehbar, dass in diesem Fall der Anteil MFHs an den Neubauten sinkt, da diese meist von Unternehmen aus wirtschaftlichen Gründen errichtet werden. Bei mangelnder Nachfrage werden Unternehmen dementsprechend von einem Bauvorhaben absehen. Im Umkehrschluss steigt der Anteil von EFHs an den Neubauten, da EFHs wiederum zumeist von Privatpersonen errichtet werden. Für diese sind die finanziellen Möglichkeiten und der Wunsch nach einem Eigenheim entscheidend. Die allgemeine Nachfrage nach Wohnraum ist dabei allerdings nicht trivial, da diese Auswirkung auf Immobilienpreise hat und somit ein Kauf einer Bestandsimmobilie einem Neubau vorgezogen werden kann.

Bei **wachsender Bevölkerung** zieht die allgemeine Bautätigkeit vermehrt an, um die Nachfrage zu decken. Im Fall der Phase III kommt erschwerend hinzu, dass es sich um Zuwanderung handelt, somit neue Wohnungen für die zugewanderten Einwohner benötigt werden. Bei einem Bevölkerungswachstum durch einen Überschuss an Geburten würde die Nachfrage erst verzögert auftreten, da die erhöhte Nachfrage vermehrt beim Auszug erwachsener Kinder entsteht. Dass bei wachsender Bevölkerung die Wohnfläche pro Person geringfügiger wächst, ist ebenfalls nachvollziehbar, da erst mit Verzögerung auf einen gestiegenen Bedarf reagiert werden kann und die Anzahl der Neubauten durch Kapazitäten im Bauwesen begrenzt sind. Eine Verzögerung ergibt sich durch den im Vergleich zu anderen Produkten langen Zeitraum von Initiation der Planung bis hin zum fertiggestellten Gebäude [62], [8]. Mit dieser Verzögerung ist insbesondere bei stark schwankenden Wachstumszahlen in Folge von Zuwanderung zu rechnen, da hierbei im Gegensatz zu einem natürlichen Wachstum ein Wechsel der Nachfrage schwieriger zu prognostizieren ist.

2.3.3 Neubau & Rückbau

Die statistischen Anpassungen in den vorangegangenen Diagrammen/Quellen treten bei der Anzahl fertiggestellter Neubauten und Abgänge von Gebäuden aufgrund der amtlichen Erfassung nicht auf.

In Abbildung 9 sind die jährlichen Zugänge an Wohngebäuden, Wohnungen und Wohnfläche dargestellt. Der ähnliche Verlauf von Wohnfläche und Wohnungen lässt eine nahezu konstante Wohnfläche pro Wohnung vermuten. Der Verlauf der zugebauten Wohnungen und der Wohnfläche ähneln sich, weshalb ebenfalls eine nahezu konstante Wohnfläche pro Wohnung naheliegt. Wird dies genauer betrachtet, stellt sich allerdings heraus, dass diese in dem betrachteten Zeitraum zwischen 90 und 117 m^2 pro Wohnung variiert.

In Abbildung 10 sind die deutschlandweiten Abgänge von ganzen Wohngebäuden und Wohnungen dargestellt. Die Anzahl rückgebauter Gebäude befindet sich im Bereich von 4-9 % der im gleichen Jahr neu fertiggestellten Gebäude. Das Verhältnis rückgebauter Wohnungen zu Wohnungen in neuen Gebäuden ist variabler und erstreckt sich im betrachteten Zeitraum auf 3-24 %. Die zuvor erwähnte höhere Rückbaurrate von MFH in den neuen Bundesländern wird

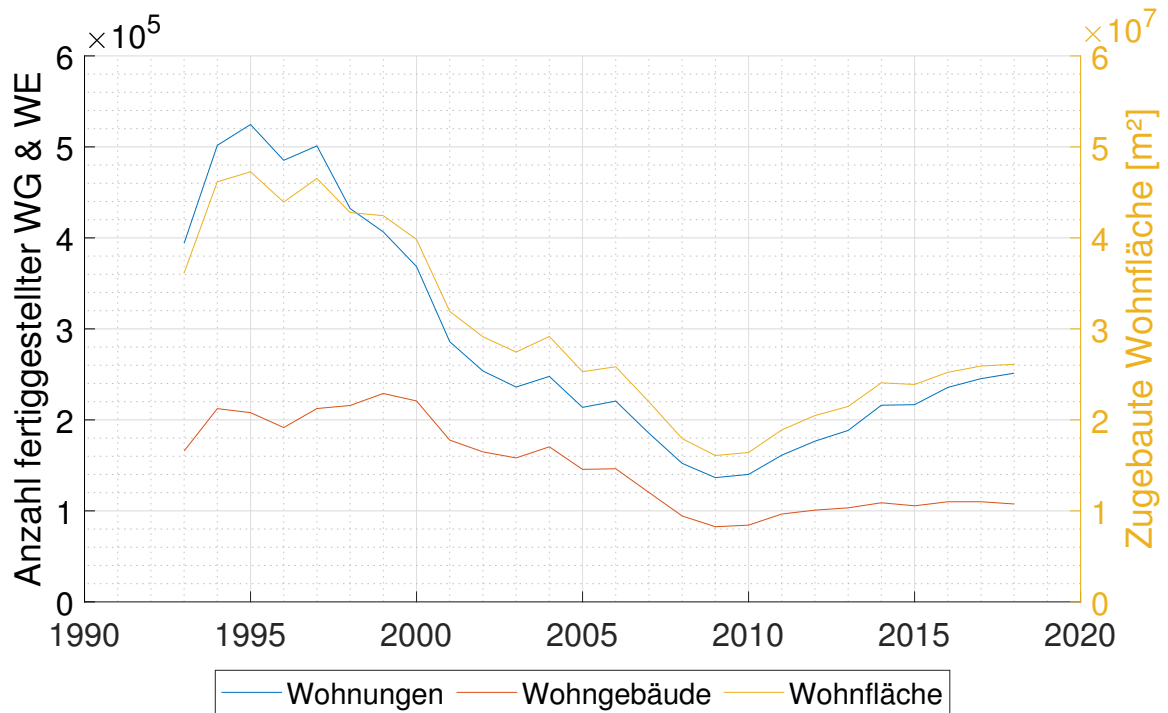


Abbildung 9: Deutschlandweite Baufertigstellungen (WG, WE & WFL) zwischen 1993 und 2018; Darstellung auf Basis von [51]

hier in den Jahren zwischen 2000 und 2010 sehr deutlich. Der Höhepunkt dieser Entwicklung ist in 2004, wo die Abgänge von Wohngebäuden um bis ca. 30 % und gleichzeitig der Abgang von Wohnungen um bis zu 150 % ggü. 2000 gestiegen sind. Werden die Abgänge mit den drei Phasen unterschiedlicher Bevölkerungstendenz (siehe 2.3.2) verglichen, zeigt sich ein zu erwartendes Bild. In Phase I mit geringfügigem Wachstum und hoher Bautätigkeit stellt sich ein sehr konstanter Abgang von 8.500 Wohngebäuden und 23.000 Wohnungen pro Jahr ein. In der Phase II mit zunehmend rückläufiger Bevölkerungsentwicklung steigen die Abgänge von Wohngebäuden und besonders bei Wohnungen auf bis zu 60.000 Wohnungen pro Jahr an. In Phase III mit steigenden Bevölkerungszahlen ergibt sich wieder eine sehr konstante Entwicklung. Diesmal sind die Abgänge der Wohngebäude (ca. 7.000 pro Jahr) allerdings im Durchschnitt geringer als in der ersten Phase. Die Abgänge bei den Wohnungen hingegen sind höher und erreichen im Schnitt 26.500 Wohnungen pro Jahr.

Interessanterweise korrelierte in der Vergangenheit das Verhältnis von EFH zu MFH im Neubau mit dem Verhältnis von Rückbau zu Neubau, indem es regelmäßig um den Faktor 10 darüber lag

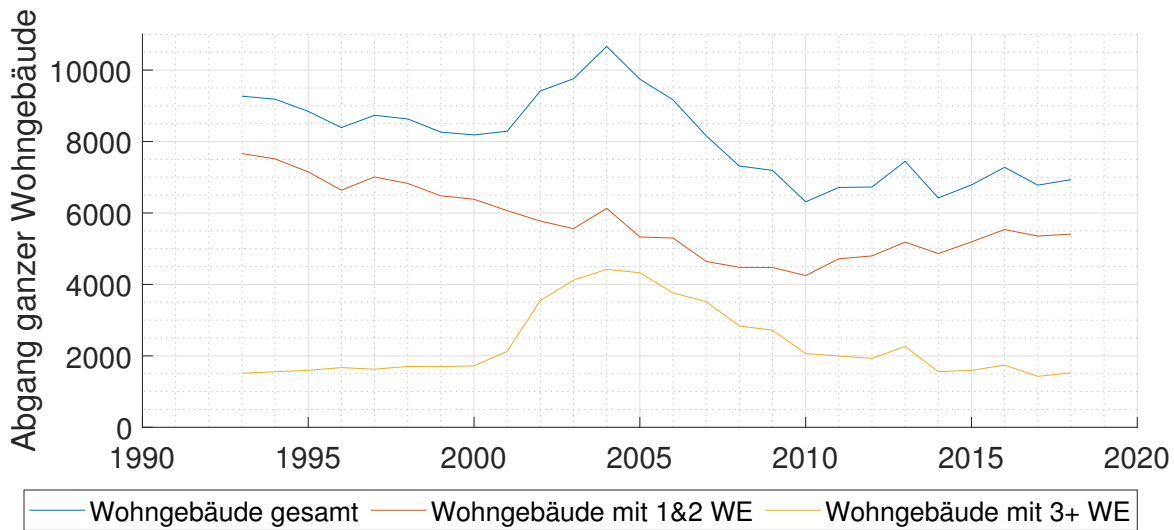


Abbildung 10: Deutschlandweite Abgänge von Wohngebäuden und Wohnungen zwischen 1993 und 2018; Darstellung auf Basis von [51]

(siehe Abbildung 11). Allerdings ist diese Korrelation in den dynamischen Jahren des Baubooms (vor 2000) und dem erhöhten Rückbau von MFH (Anfang der 2000er) weniger deutlich und zeitlich verschoben. Hier zeigt sich ein zeitlich nachziehendes Verhältnis Rückbau zu Neubau. Ein kausaler Zusammenhang ist gegeben, da in Zeiten von hohem Zubau und Bedarf vermehrt MFH gebaut werden und das Verhältnis Rückbau zu Neubau sinkt. Bei niedrigem Zubau und Bedarf wiederum werden vermehrt MFH rückgebaut und der Anteil EFH im Neubau steigt. Dies zeigte sich auch in den vergangenen Entwicklungen. Wird davon ausgegangen, dass der Bauboom ein einmaliger Effekt der Wiedervereinigung war, kann dies für die Modellierung genutzt werden und entsprechend für den weiteren Verlauf eine Korrelation der Parameter mit ca. Faktor 10 angenommen werden.

2.3.4 Zwischenfazit

Die Zahlen in den vorangegangenen Abschnitten deuten darauf hin, dass Entscheidungen für eine Investition oder Rückbau von MFH stärker vom Marktgeschehen bzw. der Nachfrage abhängig gemacht werden. Da MFH zumeist aus wirtschaftlichen Gründen errichtet und bewirtschaftet werden, ist dies kaum verwunderlich. Der Zubau und Rückbau von EZFH ist hingegen konstanter und lässt auf andere Entscheidungskriterien schließen. Zu dem gleichen Schluss kommt auch der Sachverständigenrat für Umweltfragen in seinem Umweltgutachten ([67], S.

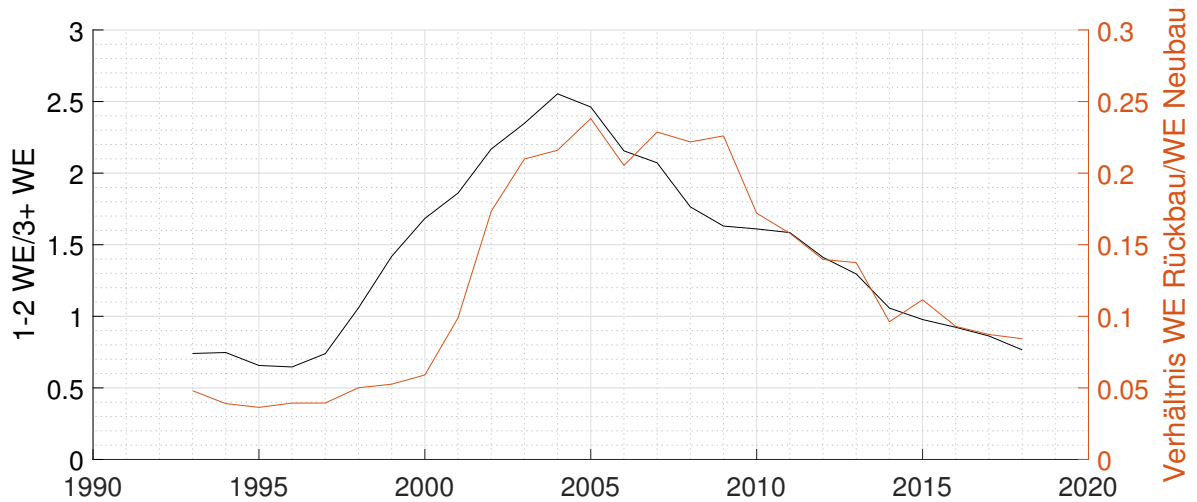


Abbildung 11: Vergleich Neubauverhältnis EFH/MFH zu Rückbau/Neubau (Daten aus [51])

265). Aufgrund der hier untersuchten Daten ist diese Schlussfolgerung allerdings nicht eindeutig, immerhin variiert die Nachfrage je nach Region stark und die zugrunde liegenden Daten sind aggregiert.

In Abbildung 12 sind die Zuwachsraten für die Wohnfläche, Wohnungen, Wohngebäude und die Bevölkerung zusammengefasst für die Jahre 1996-2018 dargestellt. Die Streuungen der Zuwachsraten bei den Wohngebäuden und der Bevölkerung entsprechen jeweils sehr gut einer Normalverteilung. Die Verteilung der Zuwachsraten bei der Wohnfläche und den Wohnungen weichen leicht davon ab. Bei der Wohnfläche sorgt vor allem die statistische Anpassung in 2010 dafür, dass der Mittelwert (siehe x in Abbildung 12) stark vom Median abweicht (durchgezogene Linie). Für die Wohnfläche als auch die Wohnungen gilt, dass die hohen Zuwachsraten in Jahren vor der Jahrtausendwende den Mittelwert jeweils deutlich über den Median anheben. Während der Trend bei der Wohnfläche und den Wohnungen zwar wieder steigend ist, ist es unwahrscheinlich, dass das Niveau des Baubooms aus den Jahren vor der Jahrtausendwende wieder erreicht wird. Auch ist es fraglich, ob die hohen Zuwanderungszahlen aus den letzten Jahren wieder auftreten und damit ein stetig hoher Bedarf an Wohnungen und Wohnfläche weiterbesteht. Der natürliche Bevölkerungstrend dagegen ist in Deutschland stark rückläufig (vgl. [50] und Abbildung 59 im Anhang).

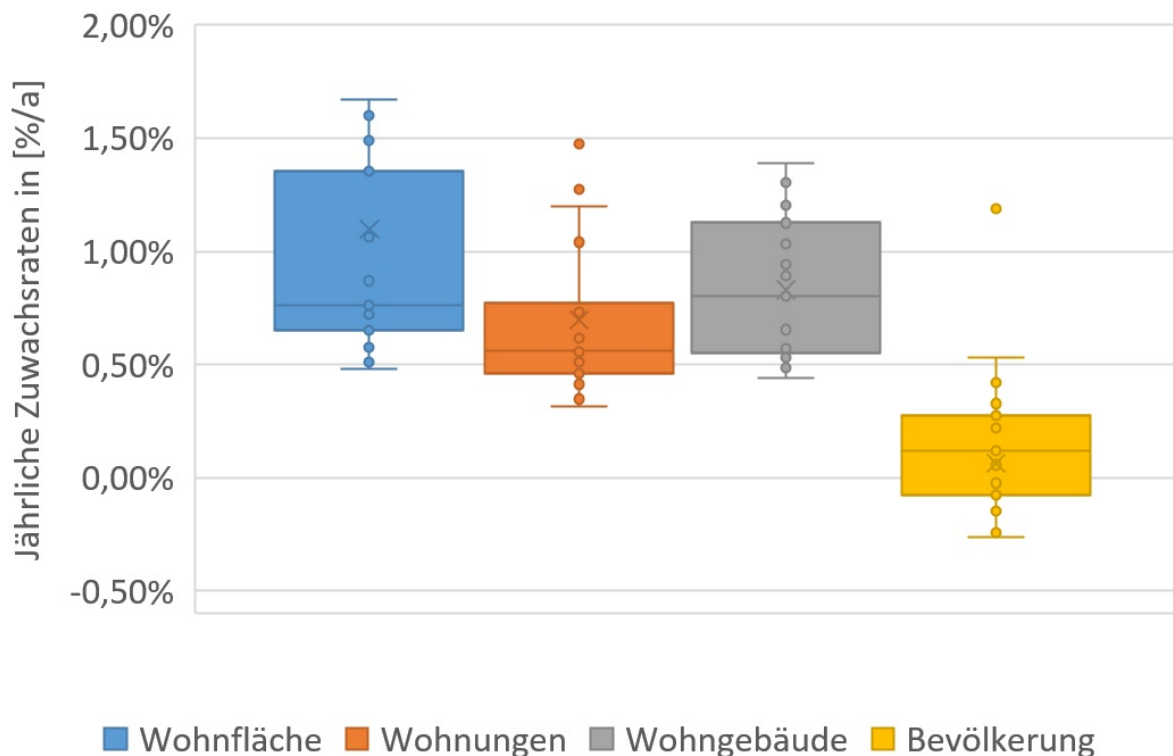


Abbildung 12: Jährliche Zuwachsraten von Wohnfläche, Wohnungen , Wohngebäuden und der Bevölkerung zwischen 1996-2018 (Quelle: Eigene Berechnungen auf Basis [51] & [53])

2.3.5 Modernisierungsraten beim Wärmeschutz

Im öffentlichen Diskurs wird oft von einer Modernisierungsrate bzw. von einer Sanierungsrate im Gebäudebereich gesprochen und dass diese verdoppelt bis verdreifacht werden soll.

Daran wird ersichtlich, dass Modernisierung¹⁰ und Sanierung¹¹ vielfach synonym benutzt werden, sind aber voneinander abzugrenzen. Der Gebrauch von unterschiedlichen Bezeichnungen für Modernisierungen und Sanierungen ist auch in englischen Veröffentlichungen zu beobachten. Hierbei sei auf [110] verwiesen, welche die im englischen synonym genutzten Begriffe einordnet. Die Bezeichnungen Modernisierung und Sanierung werden entsprechend ihrer Bedeutung in dieser Arbeit gezielt genutzt.

Die Modernisierungsrate bezieht sich auf Vollmodernisierungsäquivalente (VM) und ermöglicht eine einfache Kommunikation, indem die verschiedenen Modernisierungsraten der Bauteile in eine Zahl überführt werden. Dies ist als Ziel- und Richtwert durchaus sinnvoll. Gleichzeitig ist zu bedenken, dass es eine Vereinfachung der Realität darstellt.

¹⁰Die Modernisierung ist eine (im Kontext der Arbeit besonders energetische) Aufwertung/Verbesserung.

¹¹Sanierung ist die Wiederherstellung der ursprünglichen Qualität z.B. durch die Beseitigung von Mängeln.

In der Datenerhebung von [36] sind umfangreiche Aufstellungen der Modernisierungsaktivitäten gegeben. Tabelle 12 zeigt die BT-Modernisierungsraten beim Wärmeschutz für die Jahre 2010-2016. Es ist ein leichter Trend zu sinkenden Modernisierungsraten erkennbar. Weiterhin wird sichtbar, dass die Modernisierungsraten in Bauten mit älterem Baujahr deutlich höher sind (siehe Altbauten verglichen mit alle Wohngebäude). Neben den Unterschieden durch verschiedene Baualter sind auch verschiedene Modernisierungsraten beim Vergleich zwischen EZFH und MFH ersichtlich. Die Modernisierungsraten in MFH sind dabei leicht erhöht mit Ausnahme der Fenster. Bei den Fenstern sind die Modernisierungsraten bei den EZFH höher.

Tabelle 12: BT-Modernisierungsraten für die Jahre 2010-2016 aufgeteilt mit Differenzierung nach Altbauten und EFH zu MFH (Quelle: [36])

Mittlere jährliche Modernisierungsraten beim Wärmeschutz				
	Außenwand	Dach/OG.-Decke	Fußboden/KD	Fenster
alle Wohngebäude				
2010-2012	0,97 % +/- 0,10 %	1,67 % +/- 0,13 %	0,43 % +/- 0,06 %	1,68 % +/- 0,13 %
2013-2015	0,77 % +/- 0,09 %	1,53 % +/- 0,14 %	0,36 % +/- 0,05 %	2,09 % +/- 0,15 %
2010-2015	0,87 % +/- 0,07 %	1,60 % +/- 0,10 %	0,39 % +/- 0,04 %	1,88 % +/- 0,11 %
2010-2016	0,79 % +/- 0,06 %	1,53 % +/- 0,08 %	0,37 % +/- 0,04 %	1,82 % +/- 0,10 %
Altbauten bis Baujahr 1978				
2010-2012	1,39 % +/- 0,16 %	2,52 % +/- 0,20 %	0,63 % +/- 0,10 %	2,44 % +/- 0,21 %
2013-2015	1,05 % +/- 0,14 %	2,24 % +/- 0,22 %	0,51 % +/- 0,08 %	2,74 % +/- 0,23 %
2010-2015	1,22 % +/- 0,10 %	2,38 % +/- 0,15 %	0,57 % +/- 0,06 %	2,59 % +/- 0,16 %
2010-2016	1,12 % +/- 0,09 %	2,27 % +/- 0,14 %	0,54 % +/- 0,06 %	2,47 % +/- 0,15 %
EZFH bis Baujahr 1978				
2010-2012	1,37 % +/- 0,19 %	2,31 % +/- 0,24 %	0,54 % +/- 0,10 %	2,46 % +/- 0,25 %
2013-2015	1,03 % +/- 0,16 %	2,17 % +/- 0,26 %	0,44 % +/- 0,09 %	2,96 % +/- 0,28 %
2010-2015	1,20 % +/- 0,12 %	2,24 % +/- 0,18 %	0,49 % +/- 0,07 %	2,71 % +/- 0,20 %
2010-2016	1,10 % +/- 0,11 %	2,15 % +/- 0,16 %	0,48 % +/- 0,06 %	2,55 % +/- 0,18 %
MFH bis Baujahr 1978				
2010-2012	1,47 % +/- 0,24 %	3,41 % +/- 0,36 %	0,98 % +/- 0,20 %	2,34 % +/- 0,32 %
2013-2015	1,15 % +/- 0,20 %	2,54 % +/- 0,31 %	0,77 % +/- 0,14 %	1,85 % +/- 0,27 %
2010-2015	1,31 % +/- 0,16 %	2,97 % +/- 0,23 %	0,88 % +/- 0,12 %	2,09 % +/- 0,23 %
2010-2016	1,21 % +/- 0,15 %	2,78 % +/- 0,20 %	0,76 % +/- 0,10 %	2,15 % +/- 0,22 %

In [36] wird die VM-Rate für alle Wohngebäude im Betrachtungszeitraum 2010-2016 zu $0,99^{12}$ %/a angegeben, die VM-Rate für die Altbauten bis Baujahr 1978 zu $1,43$ %/a. Demzufolge lässt sich mit den Zahlen zum Wohngebäudebestand eine VM-Rate für die Gebäude mit Baujahr neuer als 1978 zu $0,38$ %/a abschätzen. Dabei wird die Modernisierungsrate durch den Einbezug aller Gebäude mit Baujahr nach 1978 wesentlich reduziert, wobei ein Großteil dieser Modernisierungen sicherlich auf den älteren Teil, also die Baualtersklassen zwischen 1979 und 1994, zurückzuführen ist. Im Zuge einer Nutzung von Modernisierungsraten für eine Fortschreibung des Gebäudewohnbestands stellt sich damit die Frage wie mit Modernisierungsraten in jüngeren Baualtersklassen umgegangen werden soll, da von keiner Gleichverteilung der Modernisierungsraten für die Baualtersklassen ausgegangen werden kann. Die Modernisierungsrate ist vom Alter einer Gebäudealtersklasse abhängig (vgl. Tabelle 12). Werden die Modernisierungsraten aus [36] und für die Modernisierungsrate der Baualtersklassen nach 1994 Null angenommen, ergibt sich eine VM-Rate von $0,83$ %/a (1979-1994), welche verglichen mit der Modernisierungsrate der Altbauten vor 1978 ($1,43$ %/a) realistisch erscheint.

Auf Grundlage dieser Überlegungen werden die BT-Modernisierungsraten ebenfalls berechnet und sind in Tabelle 13 angegeben. Es fällt auf, dass die Modernisierungsraten außer bei den Fenstern deutlich unter denen der Altbauten bis 1978 liegen. Dieser Umstand lässt sich durch die unterschiedlichen durchschnittlichen Lebensdauern der Bauteile begründen. Mit einer durchschnittlichen Lebensdauer von 34 und 47 Jahren (Holz- & Alufenster 2-fach verglast [18]) ist ein Höhepunkt für die Anzahl der 1. Modernisierung der Fenster in den Bauteilklassen 1978-1994 ca. in 2027 bzw. 2025¹³ zu erwarten und damit einige Jahre nach dem Betrachtungszeitraum 2010-2016. Wird die durchschnittliche Lebensdauer von Fenstern angesetzt, um daraus eine Modernisierungsrate abzuleiten, ergibt sich eine zu erwartende Modernisierungsrate zwischen $2,13$ - $2,94$ %/a (je nach Herstellungsart). Dabei ergibt sich die Modernisierungsrate aus der zu erwartenden Anzahl des Neuzustands des Bauteils über 100 Jahre von $2,13$ (im Abstand von 47 Jahre) bis $2,94$ (alle 34 Jahre) mal. Dies passt auch gut mit den erhobenen Modernisierungsraten für Fenster in Tabelle 12 überein. Weiterhin lässt sich daraus schließen, dass Fenster hauptsächlich zur Instandhaltung und nicht aus energetischen Gründen vor Ablauf der Lebensdauer ersetzt werden. Die Außenwand und das Dach besitzen eine entsprechend längere durchschnitt-

¹²Zum Vergleich: Die Arbeitsgemeinschaft für zeitgemäßes Bauen geht von einer VM-Rate von $1,1$ %/a und einem VM-Stand von 34 % aus [9].

¹³Wenn die mittlere Modernisierungsrate $2,55$ %/a als Grundlage für eine durchschnittliche Lebensdauer von $39,2$ Jahren angenommen wird.

liche Lebensdauer und die meisten Instandsetzungen für die Baualtersklassen 1979-1994 sind erst zu einem späteren Zeitpunkt zu erwarten.

Tabelle 13: BT-Modernisierungsraten unter der Annahme keine Modernisierung bei Gebäuden mit Alter <25 Jahre (Eigene Berechnungen auf Basis [36])

[% p.a.]	Außenwand	Dach/OG.-Decke	Fußboden/KD	Fenster
EZFH				
bis 1978	1,10 %	2,15 %	0,48 %	2,55 %
1979-1994	0,61 %	0,53 %	0,07 %	2,43 %
nach 1994	0,00 %	0,00 %	0,00 %	0,00 %
MFH				
bis 1978	1,21 %	2,78 %	0,76 %	2,55 %
1979-1994	0,67 %	0,69 %	0,11 %	2,05 %
nach 1994	0,00 %	0,00 %	0,00 %	0,00 %

Die Modernisierungsraten zeigen eine Korrelation mit den zu erwartenden Lebensdauern insbesondere bei Dach und Fenster. Die Thematik ist allerdings wesentlich komplexer, als es dieser erste Vergleich von Modernisierungsraten und Lebensdauern suggeriert. Am Beispiel Fenster soll nachfolgend kurz die Problematik der Nutzung von Lebensdauern erklärt werden:

- Es gibt eine Vielzahl von Ausführungsarten mit sehr unterschiedlichen Lebensdauererwartungen (z.B. Holz-, Alu- und Kunststofffenster).
- Die Ausführungsarten selbst besitzen größere Erwartungsbereiche für die Lebensdauer (siehe z.B. 23-45 (**MW 34**) Jahre Holzfenster [19]).
- Unterschiedliche Literaturquellen haben eine sehr große Bandbreite für Lebensdauerangaben (siehe Vergleich Literaturquellen für Kunststofffenster 10-60 Jahre in [109]).
- Bauteile bestehen aus unterschiedlichen Unterbauteilen die sehr unterschiedliche Lebensdauern haben können. Im Fall von Holzfenstern bspw. Holzrahmen (27a), Verglasung (34a), Drehkippschläge (31a) und Abdichtung (19a) [109]. Die Abdichtung wird durch die Möglichkeit des separaten Tausches nicht als ausschlaggebend gesehen. Entsprechend bestimmt die Lebensdauer der Holzrahmen die Bauteillebensdauer [109].
- Die Lebensdauer eines Bauteils wird durch verschiedene Faktoren beeinflusst. Für Fenster werden 33 Faktoren (z.B. Produktqualität, Wind, Feuchtigkeit, Qualität Instandhaltung,...) definiert (siehe Tab. 8-9a in [109]).

Bei den Außenwänden ist ein Vergleich von Lebensdauern mit den Modernisierungsraten aufgrund mehrerer Faktoren kaum zielführend möglich. Zum einen ist die entscheidende Baualterklasse vor 1978 (bei der ein baldiges Erreichen der mittleren Lebensdauer zu erwarten ist) stark aggregiert und zum anderen können die Modernisierungsraten auch durch „Pinselsanierungen“ (Sanierung ohne energetische Modernisierung) gering ausfallen. Die Kellerdeckendämmung geht mit keiner Sanierung einher, da die Kellerdecke in der Regel nicht saniert werden muss.

Es bleibt festzuhalten, dass eine hohe Bedingtheit der Modernisierung von der Instandsetzung von Bauteilen zu erwarten ist. Allerdings wäre eine Entkopplung der Modernisierung von der Instandsetzung notwendig, wenn davon ausgegangen wird, dass eine Vielzahl von Sanierungen bereits ohne energetische Modernisierung vonstatten gegangen sind und eine deutliche Erhöhung der Modernisierungsraten erreicht werden soll. Vor allem eine Erhöhung der Modernisierungsraten bei bestimmten Bauteilen wäre notwendig. Diese sind die Außenwand und die Kellerdecke bzw. die Bodenplatte, wobei die Außenwand den wesentlich größeren Einfluss aufgrund der Größe der Außenfläche hat.

Ende 2019 wurde das Klimapakete im Rahmen des Klimaschutzprogramms 2030 der Bundesregierung verabschiedet [20]. Es ist von Impulsen für die Modernisierung des Gebäudewohnbestands aufgrund verbesserter wirtschaftlicher Rahmenbedingungen auszugehen. Da die Änderungen an den Förderungen und beeinflussenden Rahmenbedingungen erst 2020 und zum Teil erst 2021 in Kraft getreten sind, sind noch keine Erfahrungen zu den Auswirkungen bekannt. Gesetzgebende Verfahren sind zum Zeitpunkt der Erstellung dieser Dissertation noch anhängig.

2.3.6 Wärmeversorgungsanlagen

Der derzeitige Stand der Wärmeversorgungsanlagen im deutschen Wohngebäudebestand ist in Abschnitt 2.2 gegeben. Nachzuvollziehen sind weiterhin die Entwicklungen der vergangenen Jahrzehnte und inwiefern sich diese auf die Verteilungen der Wärmeversorgungsanlagen auswirkt. Hierzu werden Daten zur Entwicklung der Beheizungsstruktur, Modernisierungsgeschwindigkeit von Wärmeversorgungsanlagen im Bestand und Absatzzahlen von Wärmeversorgungsanlagen in Neubauten und Bestand untersucht.

Einen ersten Überblick wie sich die Wärmeversorgung der deutschen Wohngebäude verändert, kann der Entwicklung der Beheizungsstruktur ausgegeben vom BDEW in Abbildung 13 entnommen werden. Es zeigt sich, dass der Anteil von Gasheizungen in den letzten 25 Jahren von 37,4 % auf 49,5 % gestiegen ist. Demgegenüber hat sich der Anteil Ölheizungen und Sonstiger von 34,0 % und 11,0 % auf 25,3 % und 6,2 % verringert. Ebenso verringert hat sich der Anteil direkt-elektrischer Beheizungsstrukturen, wie z.B. Nachtspeichern, deren Anteil hat sich von 5,6 % auf 2,6 % halbiert. Hiervon ausgenommen sind Elektro-Wärmepumpen, die einen steigenden Anteil verzeichnen. Mit 2,4 % in 2019 sind diese aber noch vergleichsweise spärlich vertreten.

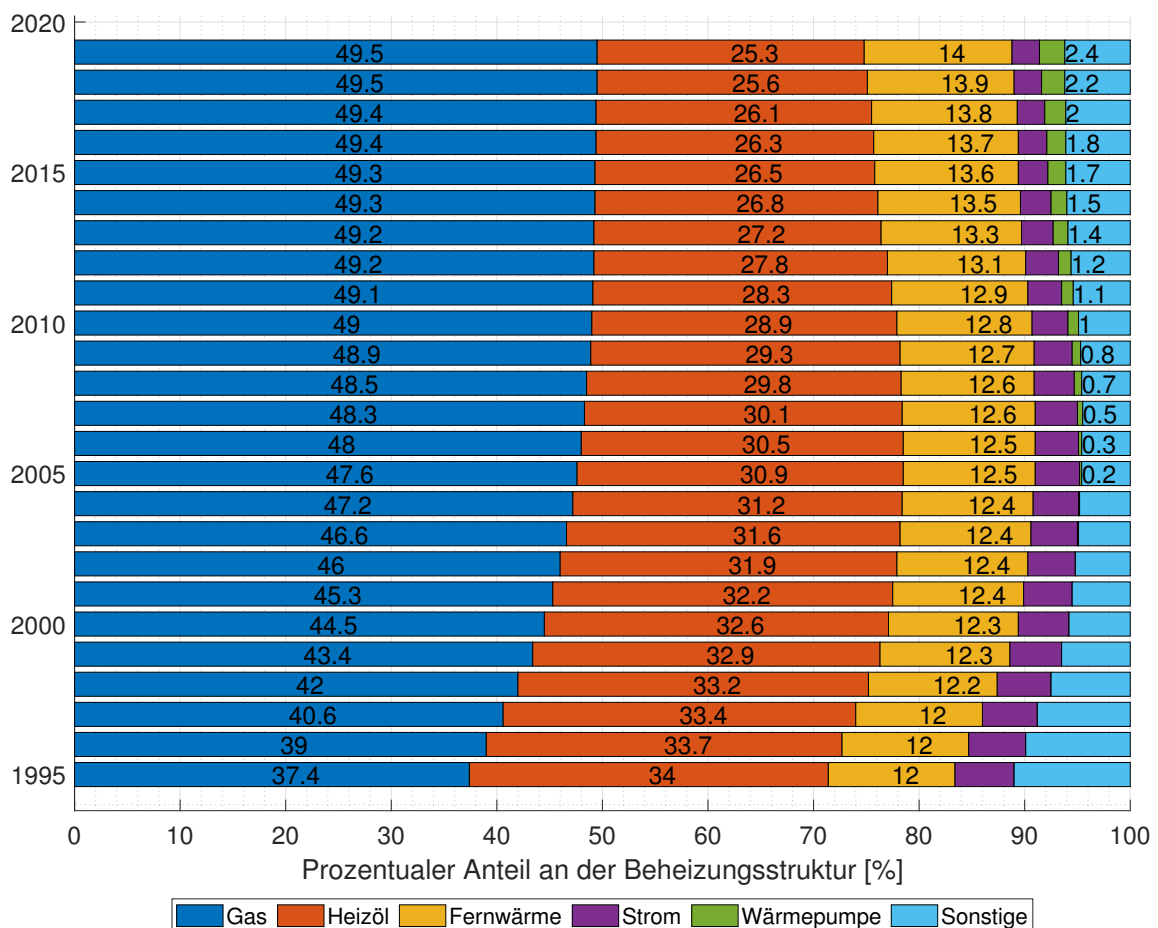


Abbildung 13: Entwicklung der Beheizungsstruktur im deutschen Wohngebäudebestand [14]

Zur Geschwindigkeit der Modernisierung im Bestand können der Datenerhebung von [36] wieder umfangreiche Informationen entnommen werden. Die durchschnittlichen Modernisierungsraten für Wärmeversorgungsanlagen beziehen sich dabei auf den Anteil der Gebäude, in dem die Wärmeversorgungsanlage modernisiert wird. Hierin sind die Neuinstallationen in Neubauten nicht einbezogen. Der Zubau von Wärmeversorgungsanlagen ist durch den Zubau von Wohngebäuden und der Beheizungsstruktur bei Neubauten nachvollziehbar.

Die Modernisierungsraten sind in [36] aggregiert für alle Wohngebäude für unterschiedliche Zeiträume zwischen 2010 und 2016 dargestellt. Daneben werden Modernisierungsraten mit den Unterschieden zwischen dem Baualter (bis/nach Baujahr (BJ) 1978), den Gebäudetypen (EFH/MFH) und zwischen Regionen Deutschlands (alte/neue Bundesländer & alte Bundesländer Nord/Süd) aufgelistet. Die unterschiedlichen Modernisierungsraten (3,27%/a bis BJ 1978, 2,69%/a BJ nach 1978) zwischen den zwei Baualtersklassen ergeben sich durch ein ebenfalls unterschiedliches durchschnittliches Alter der Wärmeversorgungsanlagen. Die Modernisierungsraten für EFHs sind mit 3,09%/a leicht höher als die der MFHs mit 2,85%/a. Die Autoren kommentieren, dass die Differenz sehr klein ist und durch die Fehlergrenzen relativiert wird (siehe Seite 87 [36]). Daneben könnte die erhöhte Modernisierungsrate in EFHs wiederum auf kürzere Lebensdauern der Anlagen in EFHs oder eine erhöhte Bereitschaft zur Erneuerung der Wärmeversorgungsanlagen vor dem Bauteilversagen schließen lassen. Eine kürzere Lebensdauer kann dabei ein Resultat schlechterer Wartung und Instandhaltung oder eines schädlicheren Betriebs z.B. durch häufigeres An- und Ausschalten der Anlagen sein.

Über die Modernisierungsraten ist die durchschnittliche Geschwindigkeit der Modernisierung von Wärmeversorgungsanlagen grundlegend bekannt. Die Art der Wärmeversorgungsanlagen, die bei einer Modernisierung installiert werden und welche in Neubauten zugebaut werden, können der Abbildung 14 entnommen werden.

Der Abbildung 14 können wesentliche Informationen zur Geschwindigkeit und Art der installierten Wärmeversorgungsanlagen zwischen 1998 bis 2015 entnommen werden. Der Trend in der Abbildung legt eine weitere Veränderung der Struktur vor allem bei den Neubauten nach 2015 nahe. Es fällt weiterhin auf, dass der Anteil neuer Wärmeversorgungsanlagen im Zuge von Modernisierungen deutlich höher ist und je nach Bilanzjahr ungefähr 4-6 mal so hoch ausfällt.

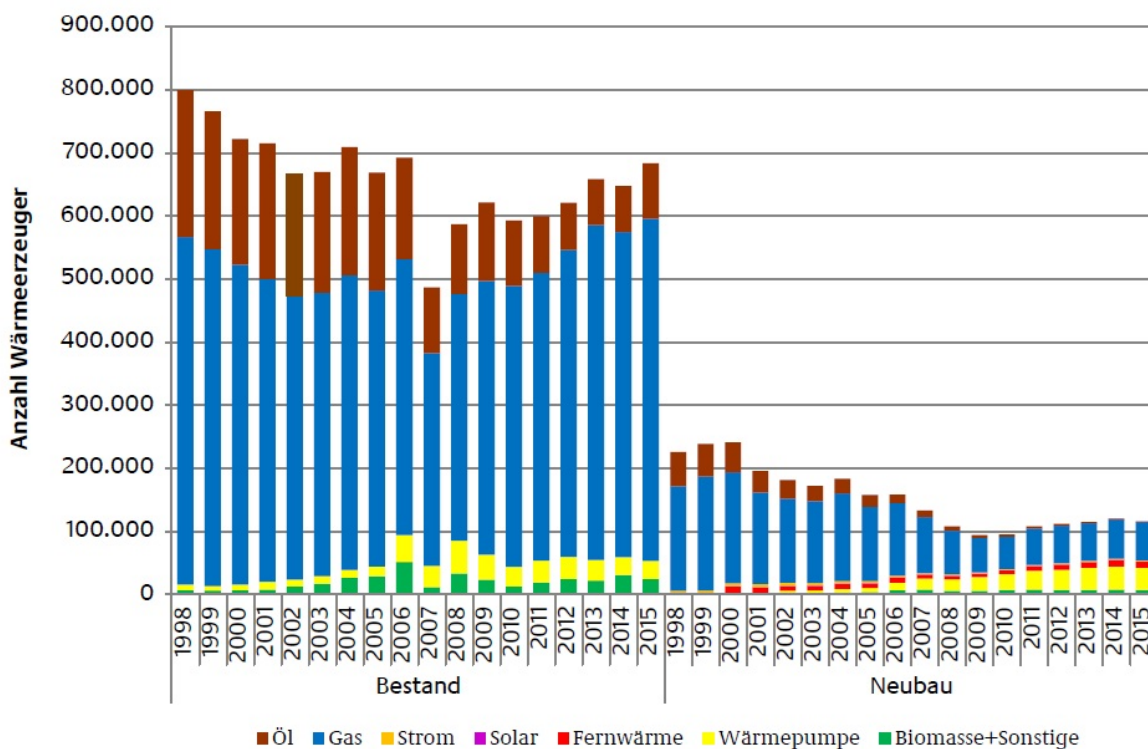


Abbildung 14: Entwicklung der Absatzzahlen von Wärmeversorgungsanlagen im Vergleich Bestand zu Neubau [42]

Die unterschiedliche Struktur bei Bestand und Neubauten wird vor allem in den jüngeren Jahren deutlich. Im Bestand wurden zum überwiegenden Anteil (>70 %), vor allem in den Jahren 2007-2015, Gasheizungen installiert. Im Neubau ist der Anteil für Gas kontinuierlich gesunken und lag 2015 nur noch knapp über dem von Wärmepumpen. Der Trend zu steigenden Anteilen von Wärmepumpen im Neubau hält weiterhin an und in 2020 war der Anteil von mit Wärmepumpen beheizten Wohnungen im Neubau mit 35,5%¹⁴ erstmals größer als der Anteil der Wohnungen die mit Wärmeversorgungsanlagen auf Basis von Gas beheizt werden (33,2%).

Inwiefern Wechsel des Hauptenergieträgers bei der Modernisierung von Wärmeversorgungsanlagen geschehen, ist der Studie vom BDEW [15] zu entnehmen. Hierzu wurden die Umstellungen von 2009 bis 2019 erfasst. In der Studie wird ausgewiesen, dass in den letzten zehn Jahren (2009-2019) in 1,7 Millionen Wohnungen (4% dt. Wohnungsbestand) der genutzte Energieträger gewechselt wurde. Bezogen auf eine theoretische Modernisierungsrate von 3,05%/a der Wärmeversorgungsanlagen bedeutet dies, dass bei ca. 13,1% aller Heizungsmodernisierungen

¹⁴Einzusehen auf der Internetseite des BDEW, zuletzt aufgerufen 09/2021 [16].

ein Wechsel des Energieträgers mit einher ging. Es zeigt sich, dass der Wechsel von Öl auf Gas mit 529.800 Wechseln zwischen 2009 und 2019 dominierend ist. Die zahlenmäßig wichtigsten Wechsel können der Abbildung 63 im Anhang entnommen werden.

2.4 Modellierung des Wohngebäudebestands

Ziel dieses Abschnittes ist es bestehende Modelle und Szenarien für den Wohngebäudebestand hinsichtlich ihrer Vorgehensweise und Ergebnisse zu beleuchten. Ebenfalls soll die Anwendbarkeit bestehender Modelle zur Beantwortung der Forschungsfragen geprüft werden.

2.4.1 Arten von Wohngebäudebestandsmodellen

Bei der Modellierung von Gebäudebeständen können die Ansätze grundsätzlich zwischen Top-Down und Bottom-Up unterschieden werden [120]. Eine kurze Erläuterung der Unterschiede dieser zwei Ansätze und ihrer Merkmale gibt Abbildung 15 und der folgende Abschnitt.

Top-Down Ansatz

In Top-Down Ansätzen werden meist gut verfügbare aggregierte Daten z.B. auf nationaler Ebene genutzt. In der Aggregation ist auch der größte Nachteil des Ansatzes begründet. Da durch eine Aggregation meist Informationen verloren gehen, können Schlussfolgerungen auf Basis von aggregierten Daten zu gänzlich unterschiedlichen Ergebnissen führen. Für den Gebäudebestand auf nationaler Ebene ergeben sich in vielen Teilbereichen andere teilweise auch gegensätzliche Trends als in einzelnen Regionen oder beim Vergleich von ländlichen und urbanen Regionen. Auch regional unterschiedliche Potenziale aufgrund von unterschiedlichen Bauweisen können nicht berücksichtigt werden. Stengel [114] fasst dies so zusammen: „Somit ist die Kombination von guter Datenverfügbarkeit und der Annahme der Fortschreibbarkeit historischer Daten zugleich Stärke aber auch Schwäche der Top-Down-Modelle, da differenzierte Analysen des Wohngebäudebestands den Einsatz von Bottom-Up-Modellen erfordern“.

Bottom-Up Ansatz

Bottom-Up Ansätze sind entsprechend granulärer und erlauben so die diverse Struktur des Gebäudebestands besser zu berücksichtigen. Sie werden vielfach für technische Potenzialun-

tersuchungen von Energieeffizienzmaßnahmen und erneuerbarer Energien oder auch techno-ökonomischen Potenzialen verwendet [114]. Durch die Granularität ist es notwendig zahlreiche Annahmen zu treffen und kleine Stichproben zu verallgemeinern [114]. Ein Beispiel hierfür ist die Nutzung von Gebäudemodellen die exemplarisch für eine große Anzahl von Gebäuden sind. Durch die Extrapolation des Gebäudemodells kann so ein Großteil des Gebäudebestands modelliert werden. Entsprechend wird durch die Extrapolation aber auch die Aussagekraft des Ansatzes verringert. Die Aussagekraft bzw. die Fehleranfälligkeit der Extrapolation sind naturgemäß auch mit dem modellierten Aspekt verknüpft. Beispielsweise können über einen Bottom-Up Ansatz auf Basis der Gebäudephysik die Potenziale von Gebäudemodernisierungen durch die Berechnung der Gebäudebedarfe im Ausgangs- und Modernisierungszustand bemessen werden. Dabei können Bedarfe durch die Transmissionswärmeverluste der thermischen Gebäudehülle gut berechnet werden. Weitere Verluste (z.B. durch Lüftung) und auch Gewinne (solare oder interne) sind allerdings schwieriger zu ermitteln, da die Varianz der Eingangsparameter sich zwischen Gebäuden gleicher Bauweise stärker unterscheiden. Entsprechend wahrscheinlich ist es, dass die Abweichungen von der Realität durch Extrapolation in diesen Fällen stärker ausgeprägt sind. Bekannterweise weichen aber auch die für ein Gebäude berechneten Bedarfe oft substantiell von den realen Verbräuchen ab. Dies kann z.B. bei einem Vergleich von Energiebedarfs- und Energieverbrauchsausweisen von Immobilien beobachtet werden (siehe [126]).

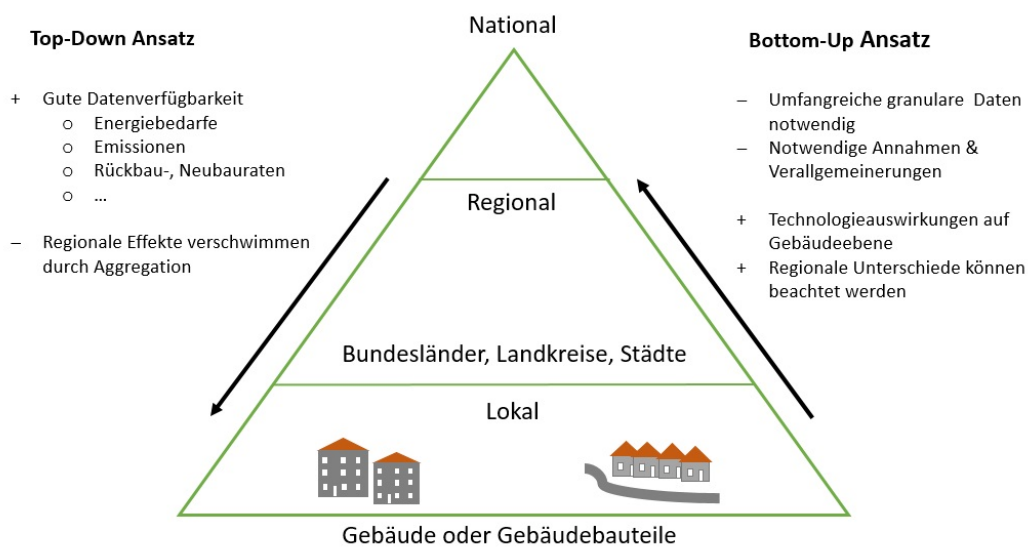


Abbildung 15: Vergleich Top-Down und Bottom-Up Ansatz für Gebäudebestandsmodelle

Die genannten zwei Ansätze lassen sich weiter hinsichtlich ihrer Eigenschaften und dem Aufbau unterscheiden. Hierzu sei auf umfangreiche Ausführungen in [120] und [114] verwiesen.

2.4.2 Überblick über bestehende Modelle & Szenarien

Für den deutschen Gebäudebestand bestehen bereits einige Szenarienbetrachtungen und Gebäudebestandsmodelle. Dabei unterscheiden sich die Untersuchungsschwerpunkte und Vorgehensweisen naturgemäß. Nachfolgend sind einige der jüngsten Veröffentlichungen aufgelistet:

1. McKenna et al. 2013 [101]:

In [101] wird die Betrachtung auf die Modernisierung inklusive einer Betrachtung des Trends mit Sensitivitätsanalyse beschränkt. Wie der Titel „Energy efficiency in the German residential sector: a bottom-up building-stock-model-based analysis in the context of energy-political targets“ [101] bereits nahelegt, wird dazu ein Bottom-Up Modell genutzt. Der Fokus liegt dabei auf Endenergie und es gibt keinen Vergleich mit Primärenergie- & Treibhausgaszielen. Die Autoren kommen zu dem Schluss, dass die Modernisierungsrate wesentlich gesteigert werden muss. Wobei die Bundesregierung zu der Zeit bereits eine Verdopplung der Modernisierungsrate von 1%/a auf 2%/a anstrebte [101]. Hieran wird ersichtlich, dass seit mindestens zehn Jahren eine Erhöhung der Modernisierungsrate von der Wissenschaft empfohlen und von der Politik angestrebt wird. Eine (deutliche) Steigerung war aber bis jetzt nicht zu verzeichnen (siehe 1%/a in 2019 in [44]). Weiterhin sehen die Autoren nur geringen Einfluss durch neue Gebäude in den Modellberechnungen und Sensitivitätsanalysen.

2. Stengel 2014 [114]:

In der Dissertation [114] basierend auf dem im gleichnamigen Forschungsprojekt entwickelten Wohngebäudebestandsmodell „OTELLO“ des KIT liegt der Fokus auf der Entwicklung eines Bottom-Up Gebäudemodells mit Schwerpunkt Modernisierung unter Berücksichtigung der Sanierungsentscheidung. Das hierzu entwickelte aktorsbasierte Wohngebäude- und Haushaltsmodell AWOHM dient der Identifizierung adäquater Bündel umweltpolitischer Instrumente mit Fokus auf der energetischen Modernisierung. Hierzu werden Eigentümer und Bewohner als Akteure in das Modell integriert. Die Differenzierung der Akteure soll es weiterhin ermöglichen die Auswirkungen entsprechender Instrumente auf

unterschiedliche Zielgruppen zu untersuchen und zu bewerten. Für das Jahr 2030 werden technische und ökonomische Reduktionspotenziale berechnet. Die technischen Potenziale werden für CO_2 , Primärenergie und Luftschadstoffe ausgegeben.

3. Jochum et al. 2015 [90]:

Die Studie [90] befasst sich mit der Untersuchung der theoretischen Einsparpotenziale von Nutzwärme in deutschen Gebäuden. Die Zielszenarien geben damit einen Einblick auf die Höhe der Nutzwärmebedarfe im Gebäudebereich, der durch entsprechende Versorgungskonzepte gedeckt werden muss. Da Einsparungen auf Seite der Nutzwärme zu direkt entgegengesetztem Mehr- oder Minderaufwand bzw. entsprechend notwendigen Emissionsreduktionen für die Versorgungskonzepte führen, können die Ergebnisse als Ausgangsbasis für weitere Untersuchungen genutzt werden. Mit den Einsparungspotenzialen bzw. dem verbleibenden Nutzwärmebedarf können also folgende Arbeiten/Projekte Versorgungskonzepte für diese Bedarfe untersuchen. Die Kombination ermöglicht dadurch zentrale Randbedingungen für mögliche Pfade zur Erreichung der Klimaziele zu identifizieren und so entsprechende Strategien für den Gebäudebestand zu entwickeln. Die Studie basiert auf dem Bottom-Up Gebäudemodell „GEMOD“. Als maximales Reduktionspotenzial für den Nutzwärmeverbrauch ggü. 2011 wird 61 % (vgl. th. Potenzial 81 %, Referenz 37 %) bei engagiertem Klimaschutz angegeben [90].

4. Diefenbach et al. 2015 [61]:

Die Analysen in [61] fokussieren sich auf die Modernisierungsrate und eine realitätsnahe Trendfortschreibung mit Sensitivitätsanalyse. Dabei wird die notwendige Modernisierungsrate bei fest definierter Modernisierungstiefe untersucht. Datengrundlage ist die selbst erhobene repräsentative Stichprobenerhebung aus 2010¹⁵. Die Modellierung wird auf Bauteilebene durchgeführt, d.h. Dach/oberste Geschossdecke, Außenwand, Kellerdecke und Fenster werden mit eigenständigen Modernisierungsraten modelliert. Daneben werden je drei Gebäudeklassen für Ein- und Mehrfamilienhäuser genutzt. Der anvisierte Zielbereich entspricht den damaligen Bundeszielen und erstreckt sich auf eine Treibhausgasemissionsminderung von 80-95 % ggü. 1990. Infolgedessen sind auch größere Anteile fossiler Energieträger in den Zielszenarien enthalten. Es werden vier Szenarien (Trend, langsam, Basis & schnell) betrachtet. Die bauteilbezogenen Modernisierungsraten werden

¹⁵Nach Veröffentlichung der Analysen wurde eine neue Stichprobenerhebung mit Stichtag 31.12.2016 durchgeführt und stellt die derzeit geeignetste Datenquelle dar.

exogen vorgegeben und wachsen jeweils mit unterschiedlichem Startjahr (2015/2020) und Geschwindigkeit linear auf Vollmodernisierungsraten von knapp unter 2%/a an. Die Steigerungen sind dabei unterschiedlich je Bauteil, da die Startwerte entsprechend variieren. In Kombination mit den energetischen Auswirkungen pro Bauteil geben die notwendigen Steigerungsraten pro Bauteil so bereits Hinweise darauf auf welche Bauteile ein besonderer Fokus gelegt werden müsste. Im Trendszenario wird eine Modernisierungsquote¹⁶ des Bestands von 52% für 2050, in den Zielszenarien von 72-79% erreicht. Die Zielszenarien erreichen einen jährlichen Emissionsausstoß, der jeweils unter dem 80% Ziel für 2050 liegt, wobei die Emissionsminderung im Szenario „langsam“ bezogen auf ein theoretisches Budget im Betrachtungszeitraum die Zielmarke um 16% überschreitet.

5. Steinbach 2015 [113]:

In [113] werden Politikinstrumente zur Förderung erneuerbarer Energien im Wärmebereich und Energieeffizienzmaßnahmen quantitativ bewertet. Ein Schwerpunkt dabei ist die Modellierung des Entscheidungsverhaltens von Investoren und die Berücksichtigung von Hemmnissen. Es werden der Wohngebäudebestand und der Nichtwohngebäudebestand im Sektor Gewerbe, Handel und Dienstleistungen in Deutschland berücksichtigt. Weiterhin werden zentrale Akteure und ihr Entscheidungsverhalten hinsichtlich Investitionen in den Gebäudebestand analysiert und modelliert. Die Modellierung basiert auf dem Bottom-Up Energiesystemmodell Invert/EE-Lab ([95] 2013, [104] 2012, [105] 2010 & [111] 2007). Durch die Kombination eines agentenbasierten Ansatzes mit einer Nested-Logit Simulation soll eine realistische Abbildung der bestehender Marktdynamiken erreicht werden. Mit dem Modell werden drei Maßnahmenbündel für den Zeitraum 2008-2020 bewertet. Die Maßnahmenbündel unterteilen sich in eine Verschärfung des Ordnungsrechts, eine Ausweitung der finanziellen Förderinstrumente und neue bundeshaushaltsunabhängige Politikinstrumente, die auf Ebene des Brennstoffhandels eingeführt werden. Für letzteres Maßnahmenbündel wird einerseits das Prämienmodell und andererseits das Portfoliomodell eingeführt. Das Prämienmodell sieht Prämien als Einmalzahlungen für die Installation von EE-Wärmeerzeugern vor. Die Zahlungen werden an Inverkehrbringer von fossilen Brennstoffen weitergereicht, welche diese an ihre Kunden abwälzen. Das Portfoliomodell sieht eine quotale Verpflichtung für die Inverkehrbringer fossiler Brennstoffe vor. Diese

¹⁶Jeweils bezogen auf den Bestand zu Beginn des Betrachtungszeitraums 2009, da Neubauten nicht in die Modernisierungsbetrachtungen mit einbezogen werden.

werden verpflichtet bestimmte Mengen an erneuerbaren Wärmemengen in den Markt zu bringen.

Aus den Ergebnissen zieht der Autor, dass die Ziele für 2020 (-20 % Wärmeenergiebedarf ggü. 2008) sehr ambitioniert sind, da keines der Instrumente zur Erreichung der Ziele ausreicht. Die höchsten Einsparungen erzielt eine ambitionierte Verschärfung des Ordnungsrechts für Bestandsgebäude mit einem Wärmeenergiebedarfsrückgang von 15,3 % (108,5 TWh). Die Maßnahmenbündel, die auf eine verbesserte Wirtschaftlichkeit für den Investor abzielen schneiden nicht so gut ab, da ein Großteil der zusätzlichen Förderung nicht zu mehr umgesetzten Maßnahmen führt. Stattdessen sind hohe Mitnahmeeffekte bei den Akteuren zu verzeichnen, die sowieso modernisiert hätten.

6. **Bürger et al. 2017 [34]:**

In der Studie Klimaneutraler Gebäudebestand 2050 [34] werden Szenarien für den deutschen Wohngebäudebestand in 2050 betrachtet. Hierzu wird ein Bottom-Up Modell mit hunderten Variationen aus Wohn- und Nichtwohngebäuden mit drei verschiedenen Sanierungstiefen (unsaniert, vollsaniert, vollsaniert plus) und einer Vielzahl Versorgungsstrukturen untersucht. Die vollsanierten Sanierungen begründen auf der Annahme EnEV2009 -25 % und Passivhausstandard und sind entsprechend ehrgeizig. Für die Entwicklung bis 2050 werden folgende exogene Parameter vorgegeben:

- +7 % Wohnfläche
- Neubaurate 0,85 %/a (2015) sinkt auf 0,2 %/a (2050)
- Rückbaurate 0,3 %/a konstant

Weiterhin orientieren sich die Zielszenarien für 2050 an Endenergievorgaben (-40 %, -55 %, -70 %). Die Zielszenarien erreichen eine THG-Einsparung von 81-86 %. Die Autoren empfehlen das Zielbild -60 % Endenergie in 2050 und leiten daraus den KfW55 Effizienzhausstandard [94] als Leitbild für die Sanierungstiefe ab [34].

7. **dena 2017 [74]:**

Der Fokus in [74] sind Szenarien zur Bestimmung der Auswirkungen unterschiedlicher Strategien (Referenz, Elektrifizierung, Technologiemic) im Gebäudesektor auf den gesamten Energiesektor in Deutschland. Hierzu wird ein iterativer Prozess genutzt. Nach der

Bottom-Up Modellierung des Gebäudesektors werden die Auswirkungen auf den Energiesektor bestimmt. Im Ergebnis kommen die Autoren zu dem Schluss, dass ein Elektrifizierungsszenario zu den geringsten Energiekosten führt, aber ein Technologiemix Szenario zu wesentlich geringeren Investitionskosten führt. Dabei wird im Technologiemix Szenario stark auf synthetische Brennstoffe gesetzt, die es erlauben die derzeitige Infrastruktur weiterzunutzen. Die großen Mengen synthetischen Brennstoffes die hierfür notwendig sind, sollen mangels notwendiger sinnvoller inländischer Erzeugungskapazitäten zum Großteil importiert werden.

8. BBSR 2021 [13]:

In der neusten Veröffentlichung (2021) in [13] werden maßgeblich zwei Szenarien, die als Trend- und Zielszenario bezeichnet werden, verglichen.

Im **Trendszenario** wird ein explorativer Ansatz gewählt, in dem die gegebenen politischen und wirtschaftlichen Rahmenbedingungen zu Beginn der Betrachtung in 2018 die Investitionsentscheidung des Gebäudeeigentümer beeinflussen. Dies geschieht auf Basis des Investitionsentscheidungsmodells Invert/EE-Lab (wie auch in 5. Steinbach 2015 [113]). Im Zielszenario wird hingegen ein normativer Ansatz gewählt, d.h. es werden feste klimapolitische Ziele vorgegeben, die eingehalten werden müssen. Für das Zielszenario wird das Modell REMod genutzt, welches das gesamte Energiesystem betrachtet und sich nicht auf den Gebäudebereich beschränkt. So wird im Zielszenario mit REMod ein gesamtwirtschaftlich kostenoptimierter Lösungspfad bestimmt, der sich an jahresspezifische sektorübergreifende Klimaziele halten muss. Die zwei Szenarien entscheiden sich dabei deutlich. Im Trendszenario werden die Klimaziele nicht erreicht, auch wenn signifikante THG-Einsparungen bis 2050 vorliegen. Vor allem das betrachtete Zwischenziel für 2030 wird mit 88 Mio. t CO_2 -äquiv. verfehlt. Dies ist der Fall, obwohl im Trendszenario höhere durchschnittliche Sanierungsraten mit bis zu 2,59 % erreicht werden. Daneben sind die Anteile von Wärmepumpen bei den Neuinstallation deutlich geringer und zeigen im Trendszenario erst ab 2040 deutliche Zuwächse mit Marktanteilen von erstmals 30 % auf. In der ergänzenden Sensitivitätsanalyse für das Trendszenario wird mit einer Kostendegression für EE-Wärmeversorgungstechnologien gerechnet. Hierdurch verändern sich die Ergebnisse des Trendszenarios deutlich und es werden bereits 2025 deutliche Steigerungen bei den Marktanteilen für Wärmepumpen ersichtlich. Dadurch werden zusätzliche 8 Mio. t CO_2 -äquiv. bis 2030 eingespart. In 2050 verbleiben 8 ggü. den ursprünglichen 19 Mio. t

CO_2 -äquiv ohne Kostendegression.

Im **Zielszenario** steigt die Sanierungsrate anfangs schneller, erreicht aber nur ein Maximum von 1,6 % pro Jahr. Die Wärmeversorgung wird deutlich schneller auf Wärmenetze und vor allem Wärmepumpen umgestellt. Ab 2030 spielen auch Brennstoffzellen eine nicht unerhebliche Rolle mit im Maximum 17 % Marktanteilen in 2030 und 2035. Diese Marktanteile sinken aber gegen 2050 auf 6 %. Die Bereitstellung der Wärmeenergie in den Wärmenetzen verändert sich im Betrachtungszeitraum auch wesentlich. Bereits 2030 werden fast 50 % der Energie durch Wärmepumpen bereitgestellt, 2018 waren hingegen noch keine Anteile von Wärmepumpen in den Netzen zu verzeichnen. Daneben sind ebenfalls substantielle Anteile von Direktstromnutzungen durch Heizstäbe in Wärmespeichern zu verzeichnen. Es ergeben sich so Emissionen in 2030 von 50 Mio. t CO_2 -äquiv. und nur noch 5 Mio. t CO_2 -äquiv. in 2040. 2050 sind auch die letzten Emissionen aus dem System verschwunden.

Für beide Szenarien wird eine kontinuierlich steigende Wohnfläche vor dem Hintergrund stagnierender Bevölkerungszahlen aus dem Projektionsbericht 2021 [108] angenommen. Diese Bevölkerungsprognose liegt über der mittleren Variante des Statistischen Bundesamtes (Variante 2, moderate Entwicklung, G2-L2-W2) in [50]. Der Wohnflächenzuwachs wächst zu Beginn um 0,67-0,70 %/a und sinkt erst auf 0,62 %/a in 2030 und dann auf 0,20 %/a in 2040.

2.4.3 Diskussion bestehender Szenarien und Modelle

1. McKenna et al. 2013 [101] :

Wird die Entwicklung der Wohnfläche in [101] mit [51] verglichen zeigt sich, dass die angenommenen Maxima in 2030 (scenario high: 3,8 Mrd. m^2 , scenario low: 3,6 Mrd. m^2 [101]) bereits in 2016 überschritten wurden. Allerdings muss auch bedacht werden, dass die Wohnfläche die für das Startjahr im Modell angenommen wurde nach [51] um +5 % für reine Wohngebäude bzw. +8 % Wohnfläche in Wohngebäuden & Nichtwohngebäuden höher war. Diese Differenzen sind sicherlich durch die statistischen Anpassungen nach dem Mikrozensus 2014 zu erklären (siehe statistische Anpassungen in den Jahren 2009 & 2010 Abbildungen 6 & 8 sowie Tabelle 11). Weiterhin wurde im Modell von [101] angenommen, dass der energetische Standard bei Neubauten stetig weiter steigt. Dabei sinkt

der Endenergiebedarf in Neubauten von 92-96 kWh/(m²a) in 2010 auf 36 kWh/(m²a) in 2020 und 18 kWh/(m²a) in 2050. Dieser beträchtliche Rückgang ist zumindest für den Zeitraum 2010-2020 noch nicht zu beobachten. Durch die vergleichsweise kleine zugebaute Menge an Wohnfläche und den hohen energetischen Standard wird ein geringer Einfluss zugebauter Gebäude im Modell begünstigt.

2. Stengel 2014 [114]:

Das entwickelte Modell in [114] nutzt einen sehr detaillierten und granulären Ansatz für die Sanierungsentscheidung und erlaubt damit spezifische Untersuchungen der Auswirkungen von politischen Instrumenten zur Beeinflussung des Gebäudewohnbestands. So können Auswirkungen auf und von verschiedenen Zielgruppen und ihrer Rahmenbedingungen betrachtet und bedacht werden. Der sehr granuläre Ansatz kann auch gleichzeitig zu Unsicherheiten führen, da jede Modellierung eine Abstraktion darstellt. Es wird für jede endogen integrierte Beziehung zwischen den Parametern, Indikatoren und Variablen auch gleichzeitig eine Unsicherheit in das Modell integriert. Ergebnisse des Modells, wie die Vollsanierungsrate von 1,7% für das Jahr 2006, legen diesen Schluss auch nahe. Da die basierenden Daten im Modell auf 2006 zurückgehen, müssten für eine Nutzung des Modells z.B. für die Beantwortung von Forschungsfragen in dieser Arbeit die entsprechenden Eingangsdaten aktualisiert werden. Hierbei führt die hohe Granularität auch zu hohem Aufwand, aber vor allem ist fraglich inwiefern aktuelle Eingangsdaten in der Detailtiefe und kompatibel zueinander zur Verfügung stehen. Fraglich ist auch wie repräsentativ verschiedene Investorentypen über einen längeren Betrachtungszeitraum (bis 2045/2050) angenommen werden können. Wenn die Einordnung in verschiedene Investorentypen zu gänzlich unterschiedlichem Entscheidungsverhalten führt, hat die Verteilung der Investorentypen, als auch Veränderungen in ihrem Entscheidungsverhalten, signifikante Auswirkungen auf die Ergebnisse. Gleichzeitig ist eine durchaus entscheidende Verschiebung in der Verteilung der Investorentypen zu erwarten, da die Akteure im Betrachtungszeitraum einerseits versterben und andererseits auch die grundlegende Einstellung einer Gesellschaft veränderlich ist. Dies ist zu erwarten, da für junge Leute der Klimaschutz eine tendenzielle höhere Bedeutung hat und auch mit zunehmenden Auswirkungen durch den Klimawandel zurechnen ist, was die Akzeptanz und das Bewusstsein für Klimaschutzmaßnahmen verstärken dürfte.

3. Jochum et al. 2015 [90] :

Die Ergebnisse des Szenarios „engagierter Klimaschutz“ in der Studie [90] sind mit -61 % Nutzwärmeverbrauch in 2050 verglichen mit dem Jahr 2011 sehr hoch und nur mit flächendeckend höchsten Anforderungen an alle Baualtersklassen zu erreichen. Dies ist gerade bei jüngeren Baualtersklassen, die keine Sanierungsnotwendigkeit aufweisen und bei denen auch nur geringe Einsparpotenziale durch höherwertige energetische Ausgangssituationen bzw. bereits mäßig gedämmte Bauteile zu erreichen sind, kritisch zu sehen. Gleiches ist natürlich auch bei Gebäuden, die erst vor kurzem modernisiert wurden und meist im Bereich der Mindestanforderungen gedämmt wurden der Fall. Entsprechend ist realistisch eher von Energieeinsparungen im Bereich des Referenzszenarios (37 %) oder dazwischen zu rechnen. Werden die angesetzten Rahmenbedingungen für das Trendszenario genauer betrachtet, wird ersichtlich, dass auch für die Erreichung des Trendszenarios die derzeitigen Bemühungen erhöht werden müssten. Die mittleren Sanierungsraten im Trendszenario betragen 1,12 % (2011) sowie 1,38 % (2020). Sie liegen damit bereits über den in dem Zeitraum beobachteten und steigen danach im Szenario weiterhin an. Der Neubau beginnt im Ausgangsjahr, welches zu einer Zeit geringerer Bautätigkeit war, und sinkt danach kontinuierlich im Betrachtungszeitraum ab. Damit läuft es vom Ausgangsjahr bis 2021 ebenfalls gegen den derzeit zu betrachtenden Trend. Gleiches gilt im umgekehrten Sinne für die Rückbaurate. Die Abweichungen bei Neubau und Rückbauraten sind durch einen erwarteten deutlichen Bevölkerungsrückgang und der tatsächlich gegenteiligen Bevölkerungszunahme begründet. Auch die Sanierungstiefen im Trendszenario erreichen ambitionierte Werte, da die U-Werte der Bauteile beginnend bei EnEV+25 % kontinuierlich absinken auf Passivhausstandard in 2050. Das theoretische Potenzial mit Einsparungen von 81 % in 2050 ggü. 2011 beschreibt ein Szenario, in dem alle Gebäude mit der bestmöglichen Technik hinsichtlich Dämmung und Wärmerückgewinnung ausgestattet sind.

4. Diefenbach et al. 2015 [61]:

Wie auch in den anderen Untersuchungen/Gebäudebestandsmodellen wird die in [61] angenommene Entwicklung der Wohnfläche durch den tatsächlichen Verlauf überholt. In [61] wächst die Wohnfläche mit Beginn in 2009 von 3,52 auf 3,84 Mrd. m^2 in 2050 an. Der Höchstwert (3,84 Mrd. m^2) der in den Betrachtungen 2050 entspricht wurde tatsächlich bereits in 2017 überschritten und die Wohnfläche wird wahrscheinlich weiterhin wachsen.

Dazu wird sie, beeinflusst durch den Wohnraummangel, ggf. sogar schneller als bis 2020 wachsen. Entsprechend ist das Neubauvolumen bis 2050 in [61] mit 18,5 % im Vergleich zum Ausgangswert in 2009 gering. Daneben liegt der Rückbau mit einem Abgang von 9 % über 40 Jahre (gleichverteilt 0,225 %/a) mit einem Faktor 3-4 über den derzeit betrachteten Rückbauten. Außer dem Szenario „langsam“ ist keines der Zielszenarien noch zu schaffen, da dazu bereits die Modernisierungsrate deutlich gesteigert sein müsste. Daneben sind auch deutlich größere Anstrengungen notwendig, um statt den Zielkorridor -80-95 % zu erreichen eine Einsparung von min. 95 % zu erzielen. Naturgemäß sind dabei die letzten Reduktionen die Schwierigeren, da der Aufwand, auch der finanzielle, dorthin stetig steigt. In den Betrachtungen wird davon ausgegangen, dass 35 % der jährlichen Modernisierungen bis 2025 dem höchsten Niveau entsprechen und ab 2026 60 %. Daneben wächst ab Beginn der erhöhten Modernisierungsrate der Anteil auf erneuerbaren basierender Heizungssysteme an den installierten von 20 % auf einen Anteil von 90 %. Auch der Anteil von Solarthermieanlagen unterstützend zum Hauptenergieerzeuger steigt linear an und erreicht teilweise Anteile über 90 % der installierten Anlagen in 2050. Vor allem letzteres ist in den bisherigen Entwicklungen der letzten Jahre nicht zu beobachten. Zwar wächst die Anzahl Solarthermieanlagen weiterhin, der jährliche Zubau sinkt aber seit 2011 stetig und entsprach dort bereits nur 60 % des Höchstwertes in 2008 [112] [31].

5. Steinbach 2015 [113]:

Die Arbeit zielt in erster Linie darauf ab, das Investitionsverhalten entscheidender Akteure zu modellieren und ist damit in einer Reihe mit 2. Stengel 2014 [114] einzuordnen. Entsprechend sind die dort angesprochenen Punkte bei der Anwendung des Modells zur Beantwortung der Forschungsfragen in dieser Arbeit ebenfalls zu erwarten.

Der Betrachtungszeitraum in der Dissertation bezieht sich nur auf die Jahre 2008-2020. Dies ist zwar ausreichend gewesen, um die Auswirkungen unterschiedlicher Maßnahmenbündel gegenüberzustellen, es verbleibt aber die Frage welche Maßnahmenbündel zu einer zielkonformen Transformation des Gebäudebestands führen. Außerdem wird nicht beantwortet welche langfristigen Auswirkungen die Maßnahmenbündel ggf. erzeugen. Die Erkenntnis, dass die Maßnahmenbündel mit einer erhöhten finanziellen Förderung bei gleichmäßiger Ausschüttung zu einem ineffizienten Einsatz führen, da ein nicht unbedeutender Teil der zusätzlichen Mittel an sowieso modernisierende Akteure fließt, ist höchst

relevant. Hieran könnte einerseits angeknüpft werden, in dem eine Lösung für einen effizienteren Einsatz gesucht wird. Dies kann tendenziell aber zu erhöhtem bürokratischen Aufwand führen. Andererseits stellt sich die Frage, ob die erhöhte Wirtschaftlichkeit, auch für zuvor bereits Modernisierungswillige, nicht indirekt die Modernisierungsrate entscheidend durch positive Erfahrungsberichte steigert.

6. **Bürger et al. 2017 [34] :**

In den Szenarien in [34] wird von einer Steigerung der Wohnfläche von +7% (2015-2050) ausgegangen. Auch wenn es durchaus sinnvoll ist die Wohnfläche pro Person nicht stetig steigen zu lassen, scheint diese Annahme, wie auch bei den anderen Untersuchungen, eher unrealistisch, da sie dem Gegenteil des derzeitigen Trends¹⁷ entspricht. Ausschlaggebend für die weitere Entwicklung wird die weitere Bevölkerungsentwicklung inklusive Wanderungssaldo und die Entwicklung des Wohnflächenbedarfs pro Person sein. Eine Begrenzung des weiteren Wohnflächenzuwachses auf +7% (2015-2050) scheint derzeit jedenfalls ohne aktive Beeinflussung unrealistisch. Der Rückgang der Neubaurate auf 0,2%/a ist ebenfalls kritisch zu hinterfragen. In den letzten 25 Jahren war die Neubaurate je nach Bezugsgröße (WG, WE oder WFL) im Durchschnitt immer deutlich darüber (0,7-1,1%/a) [49], [51]. Am geringsten war noch der Zubau von Wohnungen in den Jahren 2009 und 2010 mit einem Minimum von 0,4%/a [49], [51]. Damit ist selbst dieses Minimum noch doppelt so hoch wie der bis 2050 angenommene Durchschnitt, was eine Erreichung solch niedriger Werte nur bei entsprechend rückläufigen Bevölkerungszahlen und ggf. einer aktiven Beeinflussung seitens der Politik nahelegt. Die Rückbaurate wurde ebenfalls wesentlich höher gewählt, als es den derzeitigen Tatsachen entspricht. In 2004 war die Rückbaurate mit Abstand am höchsten und erreichte maximal 0,15% bei Wohnungen und 0,06% bei Wohngebäuden [51]. Die sich langsam steigende Sanierungsrate auf bis zu 2%/a in 2020 konnte bis jetzt noch nicht beobachtet werden und scheint auch weiterhin trotz potenziell positiver Auswirkungen des Klimapakets [20] und steigender Energiepreise in nächster Zeit unwahrscheinlich. Die Sanierungsrate wird weiterhin unverändert bei ca. 1%/a [44] erwartet. Die Zielerreichung von 81-86% CO_2 -Einsparung ist als eher konservativ und je nach Ambition (-80 oder -95% in 2050) als nicht mehr ausreichend anzusehen.

7. **dena 2017 [74]:**

Die Ergebnisse der Endenergieeinsparungen in den Szenarien in [74] sind sehr hoch, so

¹⁷Beträchtlich gestiegene Wohnfläche +30% (1998-2018) [51] und derzeitige hohe Nachfrage nach Wohnraum.

sollen 73 % im Szenario Elektrifizierung und selbst 43 % im Szenario Referenz in 2050 gegenüber 2015 eingespart werden. Für die getroffenen Annahmen im Neubau müsste sich im Zeitraum 2020-2025 der derzeitige Neubau erst halbieren und dann in 2025-2035 auf 20 % der derzeitigen Verhältnisse sinken. Die Rückbauquote ist mit 0,1 % für EFH und 0,2 % für MFH über dem derzeitigen Trend aber unterhalb der Annahmen der Szenarienbetrachtungen in anderen Untersuchungen. Die dargestellten energiebedingten Mehrkosten sind äußerst gering und betragen je nach Bauteil 7-38 %. Selbst die energiebedingten Kosten für den Keller betragen nur 8-10 Euro/m², wobei dies relativ gesehen mit die höchsten energiebedingten Kosten mit 28-33 % der Vollkosten für den Keller sind. Üblicherweise betrifft dies eine Kellerdeckendämmung die unabhängig von einer Sanierung ist und damit in der Regel zu 100 % als energiebedingte Kosten angesetzt wird. Die berechneten Vollsanierraten werden als konstante Zahlen für die Zielszenarien angegeben und reichen von 1,4-2,8 %/a, wobei Vollsanierräquivalente konstant über 2 %/a über den gesamten Betrachtungszeitraum unrealistisch erscheinen. Auch ist nicht klar wie eine Vollsanierrate von 2,8 %/a und eine von 1,8 %/a im gleichen Szenario einmal für große MFH und einmal für MFH entstehen. Im Ergebnis wird das Szenario Technologiemix mit synthetischen Brennstoffen als kostengünstigere Variante dargestellt, dies allerdings auf Basis von Investitionskosten. Es wird vermerkt, dass die notwendigen synthetischen Brennstoffe mangels innereuropäischer Kapazitäten importiert werden müssten. Hierdurch ergeben sich zwei Gefahren: Einerseits besteht dadurch wieder ein hohes Abhängigkeitsmaß von anderen Ländern durch Energieimporte. Andererseits besteht durch das Hinarbeiten auf dieses Szenario auch die Gefahr an alter Technologie festzuhalten mit der Prämisse im späteren Verlauf nur den Brennstoff wechseln zu müssen. Ob dieser Brennstoff aber verfügbar wird und für welchen Preis und unter welchen Herstellungsbedingungen ist nur bedingt durch Deutschland alleine zu beeinflussen. Entsprechend kann hierdurch ein lock-in Effekt entstehen, der entscheidend sein kann, da Gebäude im Betrachtungszeitraum - abgesehen von Teilmodernisierungen - tendenziell nur einmal modernisiert werden.

8. BBSR 2021 [13]:

Die in [13] im **Trendszenario** – welches nicht die Ziele erreicht – erzielte Sanierungsrate von durchschnittlich 2,47 % (2031-2050) erscheint für einen Trend sehr hoch, denn diese wird nicht exogen vorgegeben sondern durch die simulierten Sanierungsentscheidungen

aus dem Invert/EE-Lab Modell (s.a. 5. Steinbach 2015 [113]) berechnet. Da die Sanierungsrate zuvor im Trendszenario nur bei 1,52 % (2020-2030) lag, scheinen die Gründe für eine Modernisierung sich zugunsten einer Modernisierung zu entwickeln. Dies ist auf den ersten Blick auch logisch, steigt doch der CO_2 -Preis auf bis zu 275 Euro/t in 2040 an. Dies entspricht bei einem Verbrauch von 20.000 kWh Gas pro Jahr ca. 1.300 Euro (inkl. USt.) Mehrkosten. Dies ist durchaus eine beachtliche Summe und hilft vor allem energiebedingte Mehrkosten schnell zu amortisieren. Allerdings stellt sich bei Sanierungsraten von über 2 %/a die Frage, inwiefern weiterhin eine gleichbleibend hohe Anzahl an Gebäuden mit hohem Sanierungsbedarf vorhanden ist. Denn besteht kein Sanierungsbedarf, ist die Anwendung von energiebedingten Mehrkosten als fragwürdig anzusehen. Daneben sinken auch die potenziellen Energieeinsparungen im Laufe der Zeit, da Hochpotenzialgebäude bevorzugt als erstes modernisiert werden und neuere Gebäude geringere Einsparpotenziale aufweisen. Zwar soll die Sanierungsbedürftigkeit der Gebäude im Modell berücksichtigt sein, es wird aber nicht ersichtlich warum eine nahezu gleichverteilte Anzahl Gebäude über die Baualtersklassen bis 1994¹⁸ modernisiert wird (siehe Abbildung 42 in [13]).

Im **Zielszenario** wird von mindestens -50 % Wärmebedarf für eine Sanierung ausgegangen (ambitionierte Sanierung -64 %). Im Verhältnis zu den sehr geringen Kosten von 102 Euro/qm (ambitionierte Sanierung 180 Euro/qm) erscheint diese Nutzwärmebedarfsreduktion sehr hoch. Gleichzeitig ist nicht ersichtlich, worauf die Flächenangaben sich beziehen (BGF oder Wohnfläche). Dies wird auch nicht aus der genannten Quelle ([115]) ersichtlich. Aufgrund der geringen Kosten und dem beschriebenen Vorgehen ist aber von energiebedingten Kosten auszugehen.

Da die Sektorkopplung voranschreitet, ergeben sich durch die Optimierung des gesamten Energiesystems im Zielszenario wichtige Rückschlüsse auf den Einsatz von Heizungstechnologien im Gebäudesektor (z.B. geringerer Anteil Biomasse & Wasserstoff, da diese in anderen Sektoren priorisiert genutzt werden). Auch ein Import und größere Kapazitäten für synthetische Brennstoffe werden erst ab 2030 gesehen.

Die genutzte Methodik mit explorativem Trendszenario und normativen Zielszenario eingebettet in das gesamte nationale Energiesystem ist höchst interessant, bleibt leider aber

¹⁸Baujahr 95+ wird anfangs nur wenig und mit fortschreitendem Betrachtungsjahr zunehmend modernisiert.

die Antwort schuldig mit welchen Maßnahmen die Ziele für den Gebäudebestand erreicht werden können.

Auswertung

Es kann festgestellt werden, dass es bereits einige Untersuchungen und Gebäudemodelle mit Fokus auf den deutschen Gebäudebestand gibt. Teilweise werden in diesen Gebäudemodellen auch sehr detaillierte Entscheidungsprozesse mit Einfluss der wirtschaftlichen Rahmenbedingungen modelliert. Die Modelle mit detaillierten Investitionsentscheidungsprozessen (2. Stengel 2014 [114] und 5. Steinbach 2015 [113]) beschränken sich dabei aber auf eine kurzfristige Bewertung von Maßnahmen. In BBSR 2021 [13] wird dann in Kombination mit einem normativen Szenario das Modell aus 5. Steinbach 2015 ([113]) auch auf den Zeitraum bis 2050 angewendet.

Die positive Bevölkerungsentwicklung durch ein hohen Wanderungssaldo mit Höhepunkt in 2015 und auch danach anhaltend hohen Einwanderungszahlen hat den Bedarf für Wohnraum deutlich erhöht. Dies konnte in den länger zurückliegenden Untersuchungen nicht vorhergesehen werden. Entsprechend ist die Wohnflächenentwicklung in den Untersuchungen niedrig ausgefallen und in Konsequenz mit höheren Rückbauraten und niedrigeren Neubauraten gerechnet worden. Die Modelle beziehen sich hauptsächlich auf Sanierungsraten und -tiefen und befassen sich damit schwerpunktmäßig mit der Modernisierung der thermischen Gebäudehülle des Wohngebäudebestands. Hierbei wird entweder exogen eine feste Modernisierungsrate vorgegeben oder vereinzelt auch über Bauteillebensdauern ein Sanierungszyklus modelliert. Vielfach wurden Entwicklungen für Parameter angenommen, die die Reduzierung des Endenergiebedarfs oder die Einsparung der Emissionen begünstigen. Allerdings konnte eine solche Entwicklung in der Zeit nach der Veröffentlichung nicht beobachtet werden (z.B. Zubau Solarthermie in [61]). Daneben kommen die Untersuchungen in den meisten Fällen zu sehr ähnlichen Resultaten hinsichtlich der Vollmodernisierungsrate. Mit Ausnahme von [74], wo die Vollmodernisierungsrate konstant auf 2,2%/a für EFH und 2,8%/a für große MFH (1,8%/a für MFH) gehalten wurde, wuchs die Vollmodernisierungsrate in der Regel zu Beginn des Betrachtungszeitraums auf knapp 2%/a an. Die erreichten Endenergieeinsparungen muten durch den günstigen Wohngebäudezuwachs in den Untersuchungen, aber auch aufgrund teils sehr hoher Sanierungstiefen sehr optimistisch an und hätten zur Erreichung höhere Anreize oder eine Reduktion bestehender Hemmnisse bis einschließlich 2020 benötigt.

Der Zielparame-ter der erhöhten Modernisierungsrate, der schon seit mindestens zehn Jahren postuliert wird, konnte bis jetzt nicht erreicht werden und so vergingen die Jahre seit den hier aufgeführten Veröffentlichungen ohne nennenswerte Veränderungen der Modernisierungsgeschwindigkeit. Bemerkenswert hieran ist vor allem, dass ein Großteil der Gebäude als sanierungsbedürftig empfunden wird und noch hohe Einsparpotenziale bietet. Allerdings gehen die aufgeführten Untersuchungen auch davon aus, dass die neueren Baualtersklassen, die geringere Einsparpotenziale bieten und entsprechend auch zu einer geringeren Motivation für eine Modernisierung führen, ebenfalls modernisiert werden müssen. Während in den älteren Publikationen oftmals hohe Modernisierungsraten gefordert wurden, fällt dies in neueren Veröffentlichungen deutlich geringfügiger aus (siehe z.B. [13] Zielszenario 1,6 %/a) und das obwohl bis zu zehn Jahre bei gleichbleibend niedrigerer Sanierungsrate vergangen sind. Dass die Modernisierung höherwertiger Ausgangsgebäudezustände bedeutend schwieriger wird, wird in den Untersuchungen ohne Einfluss der Modernisierungswirtschaftlichkeit nicht betrachtet. Der ökonomische Antrieb bei der Sanierungsentscheidung wird in [114], [113] & [13] betrachtet und auch dort – mit Ausnahme der letzten Veröffentlichung [13] – nur auf den unmittelbaren Zeitraum bis 2030. Die Untersuchungen in [13] beziehen sich dabei aber nur auf ein Trendszenario und entsprechend ist in den Untersuchungen nicht beantwortet wie die derzeitige Modernisierungsgeschwindigkeit auf ein notwendiges Maß angehoben werden kann und vor allem wie sie auf dem notwendigen Niveau – um die klimapolitischen Ziele für den Wohngebäudebestand zu erreichen – gehalten werden kann.

2.5 Bestehende Prognosen & Szenarien

Für die Bevölkerungsentwicklung sind Prognosen vom Statistischen Bundesamt erhältlich. Daneben sind mögliche Entwicklungen des Wohngebäudebestands in Szenariobetrachtungen auf Basis von Gebäudebestandsmodellen, wie den im vorhergehenden Abschnitt dargestellten, zu finden.

2.5.1 Bevölkerungsentwicklung

Das Statistische Bundesamt gibt regelmäßig Bevölkerungsvorausberechnungen aus, um Basisinformationen über mögliche zukünftige demografische Entwicklungen für politische, gesellschaft-

liche und wirtschaftliche Entscheidungsprozesse zu liefern [50]. „Sie verdeutlichen die Auswirkungen heute bereits angelegter Strukturen und erkennbarer Veränderungen auf die künftige Bevölkerung. Deshalb sind sie unverzichtbar als Grundlage für politisches und wirtschaftliches Handeln“ [50].

In der 14. koordinierten Bevölkerungsvorausberechnung werden neun Hauptvarianten dargestellt, die sich aus unterschiedlichen Annahmen zur Geburtenhäufigkeit, Lebenserwartung und dem Wanderungssaldo ergeben. Die Variante 2 (moderate Entwicklung, G2-L2-W2) bezieht sich auf eine moderate Entwicklung in diesen drei Punkten. Der angenommene Wanderungssaldo entspricht dabei dem Durchschnitt zwischen 1955 und 2018. Eine detaillierte Aufstellung der Ergebnisse von Variante 2 ist in der Abbildung 59 im Anhang gegeben. [50]

2.5.2 Gebäudebestand

Das BBSR ging in seiner Wohnungsmarktprognose 2030 (veröffentlicht 2015) von einer Steigerung des Wohnflächenbedarfs von 7 % zwischen 2015 und 2030 aus [12]. Dabei wurde in der Wohnungsmarktprognose 2030 für den Zeitraum 2015-2020 von einem Bedarf von 273.000 zusätzlichen Wohnungen pro Jahr ausgegangen. Dieser Bedarf würde auf 229.000 und dann 180.000 in den Zeiträumen 2021-2025 und 2026-2030 abfallen. Die Aufteilung auf Ein- und Mehrfamilienhäuser ist in Tabelle 14 gegeben. Wird der Trend aus den Jahren 2010-2015 extrapoliert und ein leicht rückläufiger Trend angenommen, wären die zu erwarteten Bedarfe aus [12] weiterhin passend.

Tabelle 14: Erwarteter Wohnungsbedarf nach Wohnungsmarktprognose 2030 [12]

Bedarf an Wohnungen	in EFH	in MFH
2015-2020	146.000	127.000
2021-2025	129.000	100.000
2026-2030	105.000	75.000

Die tatsächlichen Zubauten an Wohnungen lagen im Zeitbereich 2015-2018 aber nur bei durchschnittlich 253.500 Wohnungen¹⁹. Diese Differenz wird zu dem derzeit vielfach angesprochenen Wohnraummangel beigetragen haben und wird entsprechend auch den Bedarf der folgenden

¹⁹225.059 (2015), 257.078 (2016), 264.719 (2017), 267.336 (2018)

Jahre vergrößern. Daneben ist der Wanderungssaldo der letzten Jahre (2016-2020) mit durchschnittlich 373.603 erhöht gewesen [55]. Dies dürfte über den Annahmen des BBSR liegen, die für den Wanderungssaldo die erhöhten Zuzüge aus den Jahren ab 2011 integriert haben, danach aber von einem sinkenden Wanderungssaldo bis zu einem langjährigen Durchschnitt von 200.000 ausgegangen sind [12]. In 2022 ist der Wanderungssaldo nochmals durch den Ukraine-krieg stark angestiegen. Es ist also weiterhin mit hohem Bedarf und dadurch induzierte hohe Zubauraten in den nächsten Jahren zu rechnen.

Eine Übersicht genutzter Parameter für den Gebäudebestand in anderen Modellrechnungen ist in Tabelle 15-17 gegeben.

Tabelle 15: Vergleich der **Wohnfläche** in anderen Modellen und Studien

Quelle	Jahr	Wohnfläche gesamt	Wohnfläche bewohnt
Stengel 2014 [114]	2006	3,54 Mrd. m^2	3,26 Mrd. m^2
Jochum et al. 2015 [90]	2008	k.A.	3,30 Mrd. m^2
Steinbach 2015 [113]	2008	3,45 Mrd. m^2	k.A.
Diefenbach et al. 2015 [61]	2009	3,50 Mrd. m^2	k.A.
McKenna et al. 2013 [101]	2010	k.A.	3,40 Mrd. m^2
destatis [51], [52]	2018	3,88 Mrd. m^2	3,56 Mrd. m^2

Tabelle 16: Vergleich der **Wohnflächenentwicklung** in anderen Modellen und Studien

Quelle	Zeitraum	Wohnflächenentwicklung
Steinbach 2015 [113]	2008-2020	+4,3 %, 3,6 Mrd. m^2 (2020, gesamt)
McKenna et al. 2013 [101]	2010-2030	+5,9-11,8 %, 3,6/3,8 Mrd. m^2 (2030, bewohnt)
Jochum et al. 2015 [90]	2008-2050	+10,6 %, 3,65 Mrd. m^2 (2050, bewohnt)
Diefenbach et al. 2015 [61]	2009-2050	+9,7 %, 3,84 Mrd. m^2 (2050, gesamt)
Bürger et al. 2017 [34]	2015-2050	+7% Wohnfläche im Verlauf abnehmend
BBSR 2021 [13]	2018-2045	0,19-0,70 %/a Wohnfläche im Verlauf abnehmend

Die Annahmen zur weiteren Entwicklungen divergieren naturgemäß. Hierbei fallen vor allem größere Unterschiede bei den Annahmen zum Rückbau auf (0,037-0,45%/a). Die höheren Rückbauraten gehen dabei von stark rückläufigen Bevölkerungszahlen aus und wachsen entsprechend

Tabelle 17: Vergleich der Parameterentwicklung für den **Neu- und Rückbau** in anderen Modellen und Studien

Quelle	Zeitraum	Parameterentwicklung
Neubau		
Jochum et al. 2015 [90]	2015-2050	0,3-0,6 %/a Wohngebäude
Bürger et al. 2017 [34]	2015-2050	0,2-0,85 %/a Wohnfläche
Dena 2017 [74]	2017-2050	153.000-270.000 WE/a
Rückbau		
Stengel 2014 [114]	2006-2030	0,037-0,043 %/a Wohnfläche
Dena 2017 [74]	2017-2050	0,1 %/a (EFH), 0,2 %/a (MFH) Wohngebäude
Jochum et al. 2015 [90]	2015-2050	0,15-0,45 %/a Wohngebäude
Bürger et al. 2017 [34]	2015-2050	0,3 %/a Wohnfläche

im Betrachtungszeitraum. Hohe Rückbauzahlen sind derzeit allerdings eher unwahrscheinlich, da zum einen die Bevölkerungsentwicklung wiederholt wesentlich über den Erwartungen lag und zum anderen das Bewusstsein für die Energieaufwendung beim Bau selbst und der bereits investierte Anteil in bestehende Gebäude (graue Energie) zunimmt. Dadurch erhält der Bestand einen höheren Wert. Der Neubau wird hingegen zusätzlich durch das Ziel verringerter Flächenversiegelung eingeschränkt.

2.5.3 Wärmeversorgung

Für die Wärmeversorgung wird vor allem durch zwei (Extrem-)Szenarien, die als technologieoffen/Nutzung von synthetischen Brennstoffen und als Elektrifizierung beschrieben werden können (siehe z.B. [115] & [43]), ein Zielkorridor aufgespannt. Ersteres greift auf einen hohen Import von synthetisch klimaneutral erzeugten Brennstoffen zurück. Das Elektrifizierungsszenario weist vor allem hohe Anteile von Wärmepumpen und eine höhere Energieeffizienz auf (höhere Modernisierungsraten und -tiefen).

2.5.4 Endenergiebedarf

Je nach Szenarien in den jeweiligen Untersuchungen werden unterschiedliche Endenergiebedarfe in 2050 erreicht. Dabei werden Variationen von Modernisierungsraten, Modernisierungstiefen, Neubauniveaus und Entwicklungen der Wärmeversorgungsanlagen genutzt und berechnet. Die erreichten Endenergiebedarfe ähneln sich hinsichtlich der oberen und unteren Grenzen. Im Fol-

genden sind einige Endenergiebedarfe für 2050 angegeben. Bei dem Wert 220,6 TWh in 2050 in [74] ist zu bedenken, dass ein Großteil der Wärme über Wärmepumpen bereitgestellt wird und hier der Anteil, der über Umweltwärme gedeckt wird, nicht eingerechnet wird. Hierdurch wird auch der Unterschied zwischen dem zu deckenden Nutzwärmebedarf und dem dazu notwendigen Endenergiebedarf sehr anschaulich deutlich.

- Ausgangswert: 617 TWh (2010), Szenarien: 366-509 TWh (2050) [101]
- Ausgangswert: 610 TWh (2010), Szenarien: 340-470 TWh (2050) [61]
- Szenarien: 220,6-515,1 TWh (2050) [74]

Für den **Nutzwärmebedarf** kann [90] **115 TWh als technisch möglicher Zielwert** entnommen werden. Allerdings beschreibt dieser Zielwert eine technisch theoretisch zu erreichende Zielgröße, die in [90] auch als unrealistisch bis 2050 angesehen wird. Stattdessen wird **für 2050 ein Zielbereich von 250-450 TWh** angegeben [90]. Der Nutzwärmebedarf zu den Endenergiebedarfen in den Szenarien wird mit 322-428 TWh angegeben (vgl. Endenergiebedarf 340-470 TWh) [61]. Im Vergleich mit den aufgelisteten Endenergiebedarfen wird daraus bereits ersichtlich, dass abgesehen von der Wärmepumpe der Wirkungsgrad der Wärmebereitstellung im Durchschnitt im Bereich von ca. 90 % liegen könnte. Auch ist eine deutliche Übereinstimmung hinsichtlich des Zielbereichs zu erkennen.

2.6 Schlussfolgerungen

In Abschnitt 2.1 werden die Zahlen des deutschen Wohngebäudebestands aufbereitet und es konnte eine Verteilung der Wohnflächen auf verschiedene Gebäudetypen und Baualtersklassen erstellt werden. Inwieweit der Gebäudebestand bereits modernisiert wurde und auf welches Niveau, kann nicht genau bemessen werden. Zwar gibt es mehrere Quellen, die Angaben zum derzeitigen Modernisierungsstand machen, eine exakte Aufteilung auf Gebäudetypen und Baualtersklassen sowie eine Bestimmung der Modernisierungstiefe im Detail ist allerdings nicht gegeben. Die Abschätzung des Vollmodernisierungsstandes von ca. 30 % aller Altbauten kann als Ausgangswert in Modellbetrachtungen benutzt werden [42]. Bei der Kalibrierung des zu entwickelnden Modells soll dieser Wert gegen dessen Ergebnisse geprüft werden. Mit Abschnitt

2.2 wird eine Aufteilung für die Verteilung der Hauptenergieträger im Wohngebäudebestand gegeben. Aufgrund von Bilanzgrenzen und unterschiedlichen Größen der Wärmeerzeuger ergeben sich aber entscheidende Abweichungen zur nationalen Endenergiebilanz. Entsprechend ist bei Nutzung der Verteilung eine Kalibrierung mit der nationalen Endenergiebilanz notwendig.

Während die Abschnitte 2.1 und 2.2 den IST-Zustand des Wohngebäudebestands beschreiben, wird in Abschnitt 2.3 der Blick auf die vergangenen Entwicklungen gelegt. Die Entwicklungen zeigen gegenseitige Abhängigkeiten der Parameter, wie z.B. Bevölkerungswachstum, Wohnflächenwachstum, Neubau, Rückbau und die Anteile von Mehrfamilienhäusern am Neubau. Dies soll genutzt werden, um entsprechende Parameter endogen zu modellieren. Auf Basis der Datenerhebung in [36] konnten mittlere Modernisierungsraten für die Baualtersklassen bis 1978 und 1994 mit Unterscheidung von Mehrfamilienhäusern und Ein- & Zweifamilienhäusern bestimmt werden. Daneben zeigt die Datenerhebung auch deutlich unterschiedliche Modernisierungsraten für unterschiedliche Bauteile. Dementsprechend werden die Außenwand und Fußboden/Kellerdecke wesentlich langsamer modernisiert als Dach/oberste Geschossdecke und Fenster. Dies ist auch nachvollziehbar, müssen Fenster und Dächer verhältnismäßig öfter instandgesetzt werden. Dadurch lässt sich bereits vermuten, dass eine Fokussierung (z.B. bei Anreizprogrammen) auf die Bauteile mit niedriger Modernisierungsrate die Energieeffizienzsteigerung im Wohngebäudebestand beschleunigen kann. Die vergangenen Entwicklungen bei den Wärmeversorgungsanlagen zeigen sehr hohe Marktanteile für Erdgasanlagen. Bei den Neubauten ist dieser Anteil durch eine kontinuierliche Steigerung der Anteile von elektrischen Wärmepumpen gesunken. Im Bestand ist hingegen bisher trotz steigender Anteile von Biomasse und Wärmepumpen noch keine Trendwende zu erkennen. Dies ist sicherlich auch auf die höheren Austauschraten von Wärmeversorgungsanlagen im Vergleich zu Modernisierungsraten zu erklären (reine Instandsetzungsmaßnahmen). Ohne begleitende Modernisierungsmaßnahmen sind Energieträgerwechsel entsprechend schwierig. Ein Wechsel zu Gas und Fernwärme ist dabei vergleichsweise einfach, sofern es bestehende Netze gibt.

Im Abschnitt 2.4 werden bestehende Modelle und Szenarien kurz vorgestellt und diskutiert. Es zeigt sich, dass bereits einige Arbeiten mit dieser Thematik bestehen. Mehrere dieser Modelle betrachten auch die Auswirkungen wirtschaftlicher Rahmenbedingungen sehr detailliert, beschränken sich dann aber auf einen Betrachtungszeitraum bis 2020 oder 2030 [114] [113].

Daneben ist während der Erstellung dieser Arbeit eine Betrachtung mit dem Modell aus [113] veröffentlicht worden. In dieser neuen Veröffentlichung [13] wird mit dem bestehenden Modell ein Trendszenario bis 2050 modelliert. Je älter die Betrachtungen werden, desto größer sind die Unterschiede zwischen getätigten Annahmen für die Szenarien und tatsächlich eingetretenen Begebenheiten (z.B. Bevölkerungsentwicklung, Wohnflächenwachstum & Modernisierungsraten). Daneben beantworten auch die Betrachtungen mit Einbezug wirtschaftlicher Rahmenbedingungen nicht, welche Maßnahmen zu einer zielführenden Entwicklung führen könnten, da sich diese auf kostenoptimale Szenarien, Trendentwicklung mit Nichterreicherung der Ziele oder kurzfristige Maßnahmenbewertung beziehen. Der Abschnitt 2.5 knüpft an 2.4 an und zeigt, dass die Betrachtungen aus 2.4 und weitere zu sehr ähnlichen Ergebnisräumen hinsichtlich der Entwicklung des Gebäudebestands führen.

3 Entwicklung des Wohngebäudebestandsmodells

Im vorhergehenden Kapitel sind grundlegende Informationen zusammengetragen, die den IST-Zustand des deutschen Wohngebäudebestands definieren. Daneben sind auf Grundlage der vergangenen Entwicklungen und Szenarienbetrachtungen auch mögliche Transformationsräume zu einem klimaneutralen Bestand beschrieben. Als zentrales Maß für die Größe des Gebäudebestands wird die bereits auf Gebäudetypen und Baualtersklassen aufgeteilte Wohnfläche genutzt. Für die in Tabelle 6 ausgewiesenen Flächen werden die Modelle entsprechend Tabelle 5 genutzt. Diese Daten dienen als Eingangsinformationen für ein Wohngebäudebestandsmodell. Mit diesem wird die Basis gelegt, um weiterführende Fragestellungen zu bearbeiten und Potenziale verschiedener Transformationspfade zu bestimmen.

Die Vorgehensweise bei der Entwicklung des Modells ist in Abbildung 2 schematisch dargestellt. Im vorherigen Kapitel wurden die Eingangswerte für das Modell (linker Abschnitt der Abbildung 2) aufgezeigt. Im folgenden Kapitel sind die Modellierungsschritte²⁰ beschrieben. Aufbauend auf den Informationen aus Kapitel 2, kann als nächster Schritt der Ausgangszustand modelliert werden. Dieser wird dann durch einen energetischen Abgleich kalibriert.

3.1 Energetischer Ausgangszustand Wohngebäudebestand

Der energetische Zustand des Gebäudebestands kann auf vielfältige Weise dargestellt werden. Hier ist die Nutzung unterschiedlicher Bilanzgrenzen und der Fokus auf einzelne Nutzenergien hervorzuheben, wodurch es bei Vergleichen unterschiedlicher Quellen zur Verwirrung und falschen Interpretationen kommen kann. Damit Fehlern vorgebeugt wird und eine sinnvolle Interpretation der Ergebnisse möglich ist, ist es wichtig die Bilanzgrenzen zu kennen und klar zu definieren. Der energetische Zustand des Gebäudebestands kann durch die Primärenergie-, Endenergie- oder Nutzenergiebedarfe oder auch deren entsprechenden Verbräuche dargestellt werden.

Bilanzgrenzen

Die grundlegende Charakterisierung der Energiemengen als Primär-, End- und Nutzenergie

²⁰ Ausnahme: Verteilung der Wohnfläche auf Baualtersklassen; wurde bereits in Kapitel 2 durchgeführt.

wird für unterschiedliche Bilanzgrenzen und den Einbezug verschiedener Verluste bzw. Umwandlungsfaktoren genutzt. Während die Primärenergie auch die Vorketten der Energiegewinnung und Energiebereitstellung einbezieht, wird die Endenergie auf die dem Kunden gelieferte Energiemenge beschränkt. Je nach Endenergieträger sind entsprechend unterschiedliche Vorketten in einem Primärenergiefaktor zu berücksichtigen. Die Umwandlung der Endenergie in die benötigte Nutzenergie unterliegt wieder Umwandlungsverlusten, die maßgeblich durch die eingesetzte Technik bestimmt sind. Entsprechend unterscheiden sich die Energiemengen je nach Umwandlungsfaktoren und technischen Wirkungsgraden signifikant voneinander (siehe Gleichung 2).

$$\sum_{i=1}^n Q_{PE,i} = \sum_{i=1}^n (Q_{EE,i} * f_{PEF,i}) = \sum_{i=1}^n \left(\sum_{a=1}^m (Q_{NE,i,a} * \eta_{i,a}) * f_{PEF,i} \right) \quad (2)$$

- Q_{PE} : Primärenergiebedarf (Energieträger i)
- $Q_{EE,i}$: Endenergiebedarf (Energieträger i)
- $f_{PEF,i}$: Primärenergiefaktor (Energieträger i)
- $Q_{NE,i,a}$: Nutzenergiebedarf (Nutzenergie a aus Energieträger i)
- $\eta_{i,a}$: Wirkungsgrad Bereitstellung (Nutzenergie a mit Energieträger i)

In Abbildung 16 sind die verschiedenen Bilanzgrenzen für ein Wohngebäude am Beispiel der Nutzenergie für Raumwärme dargestellt.

Je nach Bilanzgrenze oder auch Anwendungszweck, wenn nur einzelne Anwendungszwecke bzw. Nutzenergieformen betrachtet werden sollen, sind verschiedene Verluste zu berücksichtigen. So unterscheidet sich der Endenergiebedarf des Wärmeerzeugers durch die Verluste bei der Wärmeerzeugung ($Q_{V,WE}$) und bei der Verteilung ($Q_{V,WV}$) vom benötigten Nutzenergiebedarf für Raumwärme. Sollte der Wärmeerzeuger ebenfalls für die zentrale Warmwasserbereitung genutzt werden, sind entsprechende Bedarfe mit einzubeziehen.

Daneben muss ebenfalls zwischen Verbrauch und theoretischem Bedarf unterschieden werden, da in der Vergangenheit wiederholt größere Differenzen zwischen dem Verbrauch und dem theoretischen Bedarf festgestellt wurden²¹. Während der Verbrauch eine Messgröße ist, kann der

²¹siehe z.B. „Energiebedarf versus Energieverbrauch unter Einbeziehung von Langzeitmessungen zum Temperaturverlauf“ [1] & „Warum sind sie denn so verschieden? Energiebedarf und tatsächlicher Verbrauch - Abgleich zwischen Theorie und Praxis“ [71].

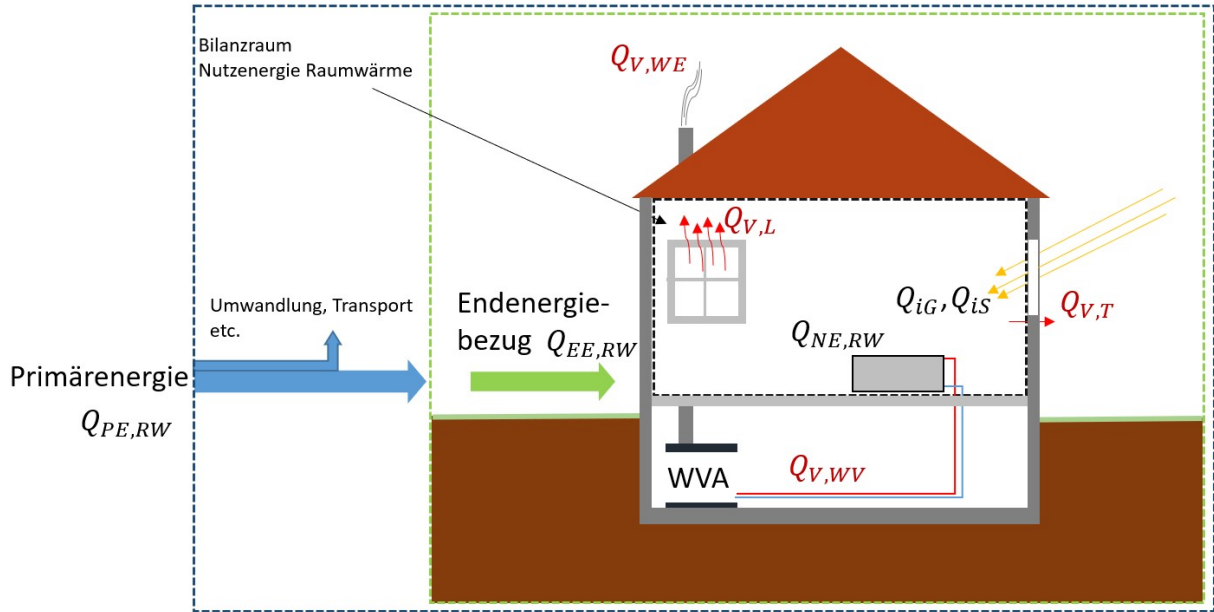


Abbildung 16: Bilanzgrenzen und Energiefluss in Wohngebäuden am Beispiel Raumwärme; $Q_{V,i}$: nicht nutzbare Verluste, Q_i : Energieeinträge und nutzbare Gewinne

Bedarf durch die Eigenschaften des Gebäudes in Kombination mit einem durchschnittlichen Nutzerverhalten berechnet werden. Damit gibt der Bedarf die energetische Qualität des Gebäudes unter standardisierten Bedingungen (DIN 18599: 2018-09) an. Gleichung 3 gibt den Primärenergieverbrauch eines Gebäudes am Beispiel der Nutzenergie Raumwärme durch die Berücksichtigung eines Verbrauchsfaktors (f_V) an. In [99] wird eine Formel für den Faktor in Abhängigkeit des Bedarfswertes auf Grundlage empirischer Daten hergeleitet, der in neueren Veröffentlichungen (z.B. [90]) weiterverwendet wird.

$$\begin{aligned}
 Q_{PE,RW,V} &= Q_{PE,RW} * f_V \\
 &= (Q_{EE,RW} * f_{PEF}) * f_V \\
 &= Q_{NE,RW} * \frac{1}{\eta_{RW}} * f_{PEF} * f_V
 \end{aligned} \tag{3}$$

mit:

$$Q_{NE,RW} = Q_{V,T} + Q_{V,L} - (Q_{i,G} + Q_{i,S}) \tag{4}$$

$$\eta_{RW} = \eta_{WE} * \eta_{WV} = \frac{Q_{NE,RW}}{Q_{NE,RW} + Q_{V,WE} + Q_{V,WV}} \quad (5)$$

$Q_{PE,RW,V}$:	Primärenergieverbrauch (RW)
$Q_{PE,RW}$:	Primärenergiebedarf (RW)
f_V :	Verbrauchsfaktor
$Q_{EE,RW}$:	Endenergiebedarf (RW)
f_{PEF} :	Primärenergiefaktor
$Q_{NE,RW}$:	Nutzenergiebedarf (RW)
η_{RW} :	Wirkungsgrad Bereitstellung (RW)
$Q_{V,T}$:	Transmissionswärmeverluste
$Q_{V,L}$:	Wärmeverluste durch Lüftung
$Q_{i,G}$:	Interne Gewinne
$Q_{i,S}$:	Solare Gewinne
η_{WE} :	Wirkungsgrad Wärmeerzeuger
η_{WV} :	Wirkungsgrad Wärmeverteilung
$Q_{V,WE}$:	Wärmeverluste durch Wärmeerzeuger
$Q_{V,WV}$:	Wärmeverluste durch Wärmeverteilung

Im Bezug auf die Nutzenergie wird gerade bei Wohngebäuden oftmals nur ein Teil der im Gebäude benötigten Nutzenergie betrachtet. Der Fokus liegt vielfach auf der Nutzenergie für Raumwärme und Warmwasserbereitung. Dabei steht die Raumwärme und Warmwasserbereitung in der Abhängigkeit zur Wärmeversorgungsanlage (WVA) und der thermischen Gebäudehülle (TGH). Die Bereitstellung der benötigten Wärme kann zentral durch eine Wärmeversorgungsanlage geschehen oder auf mehrere Anlagen aufgeteilt sein. Weitere Anlagen haben dabei oft unterstützenden Charakter (z.B. Kamin) oder es gibt eine separate Warmwasserbereitung (z.B. Durchlauferhitzer). Da die Wärmebereitstellung für Heizwärme und Warmwasserbereitung in der Regel gekoppelt geschieht, ist eine gemeinsame Betrachtung sinnvoll. Dagegen sind Nutzenergieverbräuche in Haushalten, die über Heizwärme und Warmwasserbereitung hinausgehen, von der individuell eingesetzten Technologie abhängig. Entsprechend bezieht sich auch die Warmwasserbereitung nur auf das Brauch- und Leitungswasser und nicht auf Wasserkocher oder den Herd.

Daneben wird der Nutzenergiebedarf für Raumwärme durch verschiedene Punkte wie Belegungsdichte, Nutzung, Abwärme von elektrischen Geräten, Lüftungsverhalten und Heizungssteuerung beeinflusst. Der in Gleichung 3 angegebene theoretische Nutzenergiebedarf für Raumwärme ($Q_{NE,RW}$) steht also in Abhängigkeit von nutzbaren Wärmegegewinnen ($Q_{i,G}, Q_{i,S}$) und Verlusten ($Q_{V,T}, Q_{V,L}$) im Bilanzraum (siehe Gleichung 4). Dementsprechend gibt $Q_{NE,RW}$ die Differenz an, die benötigt wird, um die Temperatur in der Wohnung auf einem gewünschten Niveau zu halten. Aufgrund der Jahreszeiten variiert der notwendige Wärmestrom $\dot{Q}_{NE,RW}$ und vor allem im Sommer können negative Werte entstehen, so dass für die Beibehaltung eines Temperaturniveaus eine Kühlung nötig wäre. Die in den Gleichungen 2-5 und Abbildung 16 dargestellten Werte beziehen sich im Sinne des Untersuchungsgebietes aber auf einen Zeitraum von einem Jahr. Der integrierte Wärmestrom, der dem Wärmebedarf im Zeitraum entspricht, wird von negativen Werten ausgenommen. Dies geschieht, da die Kühlung einerseits ein Sonderfall ist, der in der Regel nicht von der Wärmeversorgungsanlage abgedeckt wird und andererseits resultieren Zeiten notwendiger Kühlung nicht in reduziertem Heizwärmebedarf. Nichtsdestotrotz wird die Berücksichtigung von Kühllast zukünftig durch steigende Außentemperaturen voraussichtlich an Relevanz gewinnen. Der notwendige Endenergiebedarf (Q_{EE}) für die Bereitstellung des Nutzenergiebedarfs wird durch den Wirkungsgrad der Bereitstellung ($Q_{V,WE}, Q_{V,WV}$) der Nutzenergie beeinflusst.

Nationale Energiebilanz

Auf nationaler Ebene werden umfangreiche Energiebilanzen von der Arbeitsgemeinschaft Energiebilanzen (AGEB) e.V. für die Bundesrepublik Deutschland erstellt [4]. In den Energiebilanzen für die Privaten Haushalte wird nach Anwendungszweck, also Endenergieverbrauch pro Nutzenergieform, differenziert [2]. Im zu entwickelnden Wohngebäudebestandsmodell wird der Fokus auf Raumwärme und Warmwasser gelegt. Diese machen den größten Anteil beim Endenergiebedarf der Privaten Haushalte aus (vgl. Abbildung 17) und sind abhängig von der Modernisierung der thermischen Gebäudehülle und der Wärmerversorgungsanlagen. Zwar sind weitere Energieverbräuche in privaten Haushalten auch mit dem Bedarf, z.B. interne Gewinne durch Abwärme, gekoppelt, der Einfluss ist allerdings gering. Letzteres gilt vor allem vor dem Hintergrund steigender Energieeffizienz elektrischer Geräte.

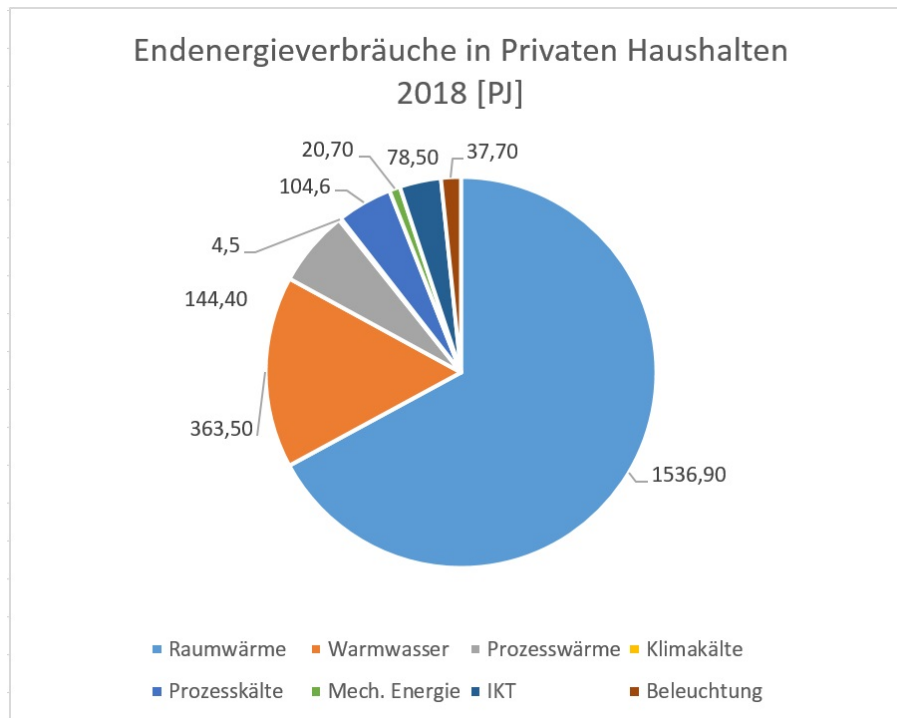


Abbildung 17: Endenergieverbräuche in Privaten Haushalten nach Anwendungszweck für 2018 [Petajoule] [2]

Aus den Anwendungsbilanzen in [2] kann der Endenergieverbrauch der Privaten Haushalte für 2018 abgelesen werden. Die AGEb gibt für 2018 einen Endenergieverbrauch der Privaten Haushalte von 1.536,9 PJ (426,92 TWh) für Raumwärme und von 363,5 PJ (100,97 TWh) für Warmwasser aus. Werden diese Werte auf die Wohnfläche bezogen, ergibt sich ein Durchschnittswert von $136,1 \text{ kWh/m}^2\text{a}^{22}$ bzw. $148,2 \text{ kWh/m}^2\text{a}^{23}$ unter der Annahme, dass leerstehende Wohnungen nicht beheizt werden und keinen Warmwasserverbrauch haben. Wird dieser Wert mit Verbrauchswerten für einzelne Gebäude in [87] verglichen, ist er teilweise niedriger als manche Standard-Vollmodernisierungen und erscheint sehr niedrig. Dies gilt vor allem vor dem Hintergrund der Mengen zu den Anteilen bereits modernisierter Bauteile bzw. VM (siehe Abschnitt 2.1 oder Angaben in [42] & [102]).

Bei der Endenergiebilanz für 2018 sollte berücksichtigt werden, dass 2018 im Vergleich sehr warm in Deutschland war und AGEb Bilanzen nicht temperaturbereinigt sind [5]. Dies ist entsprechend in der Kalibrierung des Ausgangszustandes einzubeziehen. Daneben ist ein fortschreitender Wandel des Klimas im Betrachtungszeitraum zu erwarten. Entsprechend wird sich

²²Bei einer Wohnfläche von 3,88 Mrd. m^2 in 2018 [51].

²³Berücksichtigung von 8,2 % Leerstandsquote in 2018 [52].

die zukünftige durchschnittliche Jahrestemperatur in Deutschland tendenziell eher wie 2018 als in den zurückliegenden Jahrzehnten einstellen. Werden die größten Temperaturdifferenzen der durchschnittlichen Jahrestemperaturen [69] der letzten Jahre mit den entsprechenden Endenergiebilanzen aus AGEB [2] verglichen, ergeben sich Abweichungen von bis zu 17 %.

- 2013 -> 2014: +1,6°C / -17 % Endenergiebedarf für Raumwärme und Warmwasser
- 2017 -> 2018: +0,9°C / -3 % Endenergiebedarf für Raumwärme und Warmwasser

Die Auswirkungen der Temperatur auf den Endenergiebedarf sind dabei naturgemäß in der Heizperiode wesentlich stärker und damit nicht direkt proportional an die Jahresdurchschnittstemperatur gebunden. Dies zeigt sich auch am Beispiel für das Jahr 2018. 2018 war zwar das bis dato wärmste, dennoch war der Februar und Anfang März 2018 sehr kalt mit Lufttemperaturen die mehrfach -10°C erreichten (siehe [69]). Dies schlägt sich auch im Vergleich zu 2017 trotz relativ hohem Unterschied der Jahresdurchschnittstemperatur (+0,9°C) nieder. Nichtsdestotrotz ist mit einem entscheidenden Einfluss durch die Klimaveränderungen bereits jetzt (siehe 2013->2014) und vor allem im Betrachtungszeitraum zu rechnen. Eine Witterungsbereinigung lässt sich über die Klimafaktoren des Deutschen Wetterdienstes (DWD) berücksichtigen (siehe [65]).

Modellierung des energetischen Ausgangszustands

Im Wohngebäudebestandsmodell wird Wohnfläche als zentrale Variable für die Entwicklung des Wohngebäudebestands genutzt. Kombiniert mit den flächenspezifischen Bedarfen für Raumwärme und Warmwasser aus TABULA [87], kann so der Nutzenergiebedarf berechnet werden. Hierbei muss die Nutzung einheitlicher Referenzflächen (1) im Wohngebäudebestandsmodell und für die spezifischen Bedarfe sichergestellt werden. Für einen Abgleich mit der Energiebilanz der AGEB, welche den Endenergieverbrauch für Raumwärme und Warmwasser ausweist, ist eine Umrechnung der Nutzenergiebedarfe (2) in Verbräuche und die Berücksichtigung der Wirkungsgrade der Wärmeverteilung (3) und Wärmeversorgungsanlagen (4) notwendig.

1) Referenzfläche

TABULA nutzt als Referenzfläche nicht die Wohnfläche nach der Wohnflächenverordnung - WoFlV wie [51]. Eine Umrechnung kann trotzdem einfach vorgenommen werden, da die Flä-

chen sich nur durch den Faktor 1,1 unterscheiden [59] :

$$Destatis\ WFL * 1,1 = TABULA\ reference\ area \quad (6)$$

2) Verbrauch und Bedarf

Der tatsächliche Verbrauch weicht vielfach von dem theoretischen Bedarf ab, wodurch Einsparpotenziale von energetischen Modernisierungen in der Vergangenheit überschätzt wurden [90]. Da ein Abgleich theoretischer Bedarfe mit den tatsächlichen Verbräuchen des Gebäudebestands vorgenommen werden soll, ist die Berücksichtigung eines Korrekturfaktors notwendig. Für das Gebäudemodell „GEMOD“ wurden die beeinflussenden Faktoren in [90] untersucht, um diese entsprechend modellieren zu können. Diese Faktoren werden in einem Prebound- und einem Rebound-Effekt zusammengefasst [90].

- Prebound-Effekt: Geringerer Verbrauch vor der Modernisierung durch sparsames Verhalten
- Rebound-Effekt: Höherer Verbrauch nach Modernisierung durch weniger sparsames Verhalten

Beide Effekte verringern das theoretische Potenzial einer energetischen Modernisierung. Nach Auswertung von sechs Studien²⁴ wurde in [90] die Funktion für den Verbrauchsfaktor in Abhängigkeit des Endenergiebedarfs aus [99] übernommen (vgl. Gleichung 7).

$$f_V(q_{EE}) = -0,2 + \frac{1,3}{1 + \frac{q_{EE}}{500}} \quad (7)$$

Spezifische Nutzenergiebedarfe, wenn nicht bereits Verbrauchswerte in TABULA vorhanden sind, werden für das Wohngebäudebestandsmodell entsprechend ebenfalls mit Gleichung 7 in Nutzenergieverbräuche umgerechnet.

3) Wirkungsgrade der Wärmeverteilung

Für die Wirkungsgrade bzw. die Verluste der Wärmeverteilung kann direkt auf Daten aus TABULA zurückgegriffen werden. Diese werden als Energiebedarfe ab Wärmeerzeuger ausgegeben.

²⁴[77], [72], [124], [99], [47], [97]

Im Gegensatz zum Endenergiebedarf sind hier allerdings noch keine Verluste bzw. Wirkungsgrade der Wärmeversorgungsanlage integriert.

4) Wirkungsgrade der Wärmeversorgungsanlagen

Zwar sind in TABULA ebenfalls Daten für den Endenergiebedarf gegeben, doch beziehen sich diese für die Gebäude der Baualtersklassen auf einheitliche Wärmeversorgungsanlagen. Damit bilden diese nicht die unterschiedlichen Aufwandszahlen verschiedener Anlagentypen, die für die Berechnung des Endenergiebedarfs auf Basis der Energiebedarfe ab Wärmeerzeuger notwendig sind. In Tabelle 18 sind die im Modell integrierten Jahresnutzungsgrade angegeben [30]. Es sei darauf verwiesen, dass Energiebilanzen sich auf die unteren Heizwerte von Energieträgern beziehen und sich dadurch auch Wirkungsgrade von über 100 % bei Brennwertgeräten einstellen können. Brennwertgeräte nutzen auch die Verdampfungsenthalpie des Wassers und damit können Energiemengen, die über 100 % des unteren Heizwertes von brennbaren Energieträgern entsprechen, nutzbar gemacht werden. Da sich die Jahresnutzungsgrade auf einen Durchschnittswert im Jahr beziehen und damit auch nicht optimale Arbeitszustände (z.B. Teillast, Anfahrvorgänge, etc.) enthalten, ergeben sich keine Werte über 100 %. Für WP wird ein Jahresnutzungsgrad von 350 % bzw. eine Jahresarbeitszahl (JAZ) von 3,5 aus [30] für Neubauten und in Modernisierungen übernommen. Allerdings sind solch hohe JAZ derzeit im Durchschnitt nicht zu beobachten. Werden die Hochrechnungen von [14] genutzt, lassen sich durchschnittliche JAZ von unter 3 und ca. 2,5 abschätzen. Für installierte Anlagen vor 2018 wird eine durchschnittliche JAZ von 3 übernommen.

Tabelle 18: Im Modell integrierte Jahresnutzungsgrade verschiedener Wärmeversorgungsanlagen; für WP entspricht der Jahresnutzungsgrad der Jahresarbeitszahl (basierend auf [30])

Anlagenart	bis 1994	Mod & nach1994
Fernwärme	90 %	95 %
Gas	85 %	95 %
Heizöl	85 %	95 %
Holz/Biomasse	85 %	85 %
Kohle	70 %	-
Strom	100 %	100 %
	Bestand	Mod & Neubau
WP (JAZ=3,0/3,5)	300 %	350 %

In [13] werden die Jahresnutzungsgrade für Heizung (nach Vorlauftemperatur 35°C oder 55°C) und Warmwassererzeugung getrennt in das Modell integriert. Die genutzten Jahresnutzungsgrade sind vergleichbar mit denen in Tabelle 18. Bedeutendster Unterschied sind die Nutzungsgrade für die Wärmepumpen, da einerseits hinsichtlich Luft- und Erdwärme-WP unterschieden wird und bei WP die Vorlauftemperatur sehr entscheidend ist. Die Jahresnutzungsgrade variieren zwischen 3,4-5,1 und weichen damit nur nach oben signifikant ab. D.h. die WP wird vergleichsweise nachteilig durch die Jahresnutzungsgrade in Tabelle 18 in das Modell integriert.

Die Wirkungsgrade der WVA müssen entsprechend separat integriert werden. Als erstes werden hierzu die Nutzenergieverbräuche der Wärmeerzeugung pro Baualtersklasse wie zuvor bis 3) angegeben berechnet. Dies entspricht dem Nutzenergieverbrauch, der von der Wärmeversorgungsanlage zur Verfügung gestellt werden muss, enthält aber noch nicht die Verluste der Anlage selbst. Dazu wird ein bereits „vollmodernisierter“ Anteil der Altbauten (bis 1978) des Gebäudebestands von 33,5% angenommen. Die 33,5% beziehen sich dabei auf die 30% VM aus [42] plus weitere 1% für die Jahre 2017 und 2018. Werden die 1% pro Jahr für 2017 und 2018 auf den kleineren Bestand der Altbauten bezogen, ergibt sich ein Anteil von 3,5% VM bei den Altbauten.

Die Modernisierungstiefen sind nicht genau bekannt, deshalb wird sich an den Antragszahlen für KfW-Effizienzhäuser orientiert, die aber kein genaues Bild des Modernisierungsgeschehen widerspiegeln noch direkt in TABULA Modernisierungskonzepte übersetzt werden können. In [45] (S.15) sind die Anteile KfW55 und KfW70 für Sanierungen mit ca. 30-35% für die Jahre 2018-2020 aufgeführt. Deshalb wird im Modell angenommen, dass 65% zu einer konventionellen Modernisierung nach TABULA und 35% einer zukunftsweisenden entsprechen. Es ergibt sich eine Verteilung der theoretischen Verbräuche für die Baualtersklassen wie in Abbildung 18. Die Summe der Verbräuche übertrifft mit 565 TWh/a bereits ohne die Berücksichtigung der Verluste durch die WVA (Schritt 4) die Endenergieverbräuche aus dem Jahr 2018 nach [2] um +7%.

Wie bereits erwartet, liegen die Ergebnisse über denen der Energiebilanz 2018. Im nächsten Schritt wird deshalb der Ausgangszustand untersucht und kalibriert.

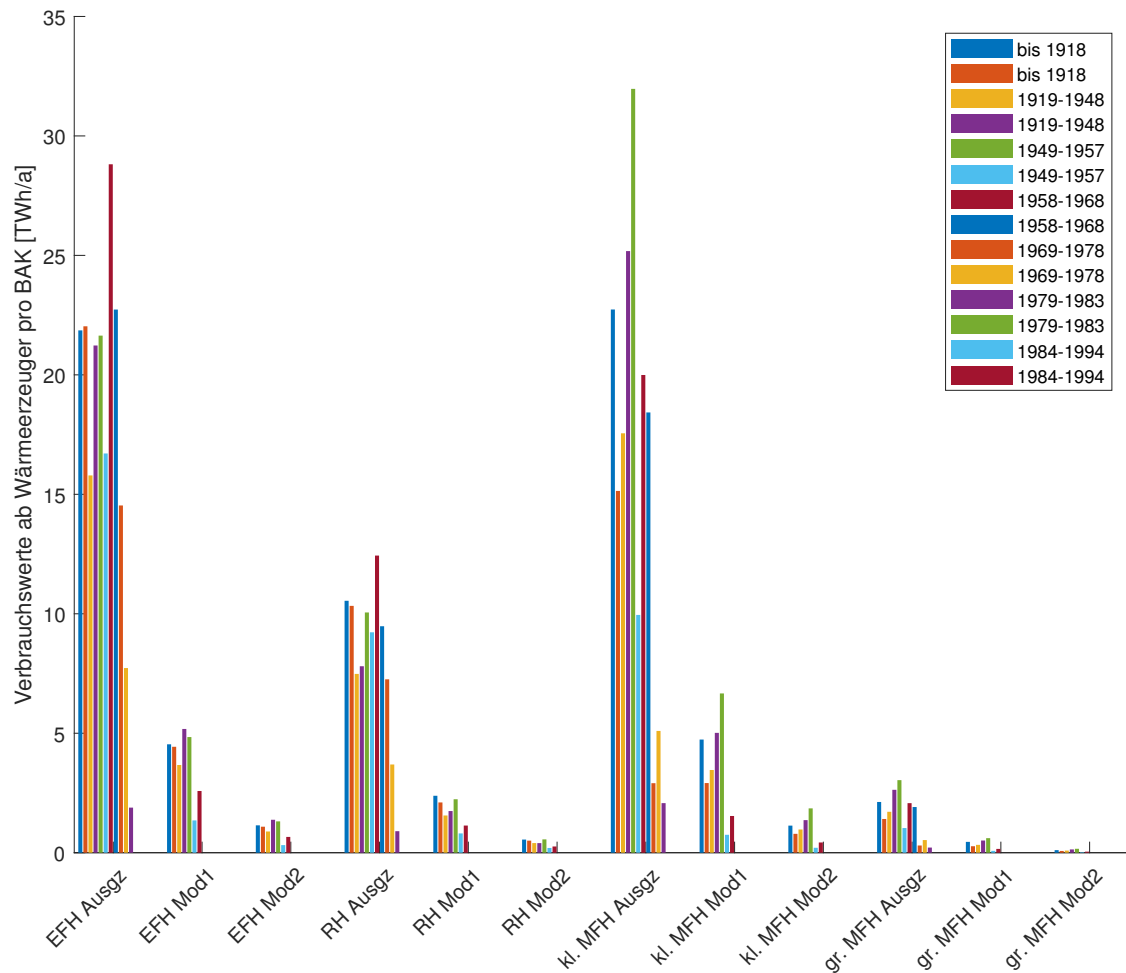


Abbildung 18: Verbrauchswerte für Nutzwärme vor Kalibrierung pro Gebäudeklasse im Modell für das Ausgangsjahr 2018

3.2 Abgleich Energetischer Ausgangszustand Bilanz Deutschland

Im folgenden Abschnitt wird die Ausgangsenergiebilanz um die WVA und deren Verluste erweitert und damit in eine Endenergiebilanz umgerechnet. Dabei wurden die WVA vorerst im Ausgangszustand nicht integriert, da deren Verteilung nur auf zusammengefasste Gruppen von Baualtersklassen²⁵, ohne Angaben zur Verteilung von WP in Altbauten und auf Wohngebäude bezogen (siehe Tabellen 8 & 9), bekannt ist. Somit sind Größe, Auslastung und Verteilung in den genutzten Baualtersklassen noch nicht ausreichend definiert. Durch einen Abgleich mit den Top-down Energiebilanzen von AGEB, kann die Verteilung weiter verfeinert werden.

²⁵ Werden die Prozentwerte in den Tabellen 8 & 9 durch die jeweiligen Summen der BAKs dividiert, zeigen sich für Gruppen von BAK (z.B. Gruppe 1 vor1918-1978) gleiche Werte pro Energieträger.

Die Kalibrierung ist in zwei Schritte (1. Gesamtbilanz, 2. Endenergie pro Energieträger) geteilt und dient dabei auch der Transformation der detaillierten Verteilung (auf WG bezogen) zu einer Verteilung bezogen auf die generierte Nutzwärme der WVA (zum Abgleich mit der Endenergiebilanz nach [4]). Die Kalibrierung ist darüber hinaus notwendig, da abweichende Ergebnisse durch die unterschiedlichen Ansätze zur Berechnung der Energiebilanz für Deutschland²⁶ zu erwarten sind. Dies hat das Ergebnis im vorherigen Abschnitt auch bereits nahegelegt. Allerdings sind grundlegende Punkte in der Bilanz im Modell noch nicht berücksichtigt, die im ersten Schritt der Kalibrierung integriert werden.

1. Kalibrierung Gesamtbilanz:

Anteil modernisierter Gebäude

Der Anteil der modernisierten Gebäude wurde entsprechend Literaturquellen zu 33,5% bei den Altbauten (bis 1978) bestimmt und integriert. Da die Gesamtenergiebilanz verglichen mit [2] wesentlich höher ausfällt, wird ebenfalls ein Anteil von 15%²⁷ der modernisierter Altbauten für die Baualtersklassen 1978 bis 1994 angenommen. Eine weitere Steigerung des modernisierten Anteils ist nicht durch Literaturquellen zu rechtfertigen und entsprechend wird davon abgesehen.

Zusätzliches Heizgerät

Jede vierte Wohnung in Deutschland besitzt ein zusätzliches Heizgerät [14]. Davon sind ca. 77% Kamine oder Öfen mit Holz als Brennstoff [14]. Nur so lässt sich auch der hohe Anteil von Erneuerbaren ca. 17% (319,6 PJ)²⁸ in [2] und der Anteil Biomasse in der Satellitenbilanz [3] verglichen mit den ca. 5% Hauptenergieträger auf Basis Biomasse in Tabelle 7 erklären. Für das Modell werden die Anteile Erneuerbare in ihre Bestandteile aufgeteilt (siehe Tabelle 19). Da die Anteile Erneuerbare mit Ausnahme „Biomasse WVA“ unterstützenden oder nachrichtlichen Charakter haben, werden sie im Modell gesondert behandelt und nicht in der Energieträger-

²⁶In [2] wird ein Top-Down Ansatz für die Energiebilanzen genutzt. Im Modell wird die Energiebilanz mit einem Bottom-Up Ansatz durch die Summen der Energieverbrauchswerte von Wärmeversorgungsanlagen in Gebäudemodellen berechnet.

²⁷Annahme auf Basis der VM-Raten aus 2.3.5 Modernisierungsraten beim Wärmeschutz: 1,43%/a Altbauten vor 1978, 0,83%/a BAK 1979-1994 und 33,5% modernisierter Anteil Altbauten vor 1978

²⁸Die Gesamtmenge weicht in der detaillierten Aufstellung [3] geringfügig (1,5 PJ) von [2] ab und wurde Geothermie und Umweltwärme zugerechnet.

verteilung für die WVA geführt. Nachrichtlich ist die Geothermie²⁹ und Umweltwärme, welche direkt an Wärmepumpen und deren JAZ gekoppelt ist.

Tabelle 19: Aufteilung Erneuerbare im Modell im Startjahr 2018; WVA: Wärmeversorgungsanlage; die Aufteilung Biomasse WVA wurde anhand der Anzahl entsprechender Anlagen mit Hauptenergieträger abgeschätzt (eigene Berechnungen basierend auf [2] & [3])

	PJ	% von Erneuerbare	% gesamt
Biomasse WVA	80,5	25,2 %	4,2 %
Biomasse sonstige	161,5	50,5 %	8,5 %
Solarthermie	30,5	9,5 %	1,6 %
Geothermie & Umweltwärme	47,1	14,7 %	2,5 %
Gesamt	319,6	100 %	16,6 %

Witterung

Wie bereits zuvor erwähnt, war 2018 ein besonders warmes Jahr in Deutschland. Um den Einfluss im Modell zu berücksichtigen, wird die Witterung als Faktor in das Modell aufgenommen. Für den Faktor in 2018 wird ein Einfluss von 0,8-1,0³⁰ (Reduktion des Wärmebedarfs) erwartet und für den ersten Schritt der Kalibrierung untersucht. Durch die Integration des Witterungsfaktors wird der klimabereinigte jährliche Wärmebedarf der Gebäudemodelle reduziert. Aus den Klimakorrekturfaktoren [65] des Deutschen Wetterdienstes lässt sich ein Witterungsfaktor für 2018 von 0,8835 berechnen. Daneben lässt sich ein durchschnittlicher Witterungsfaktor von 0,924 für die Jahre 2014-2019 aus den Klimakorrekturfaktoren errechnen. Dieser wird als Grundlage für die Integration der Witterung in das Modell genutzt. Zusammen mit einem Faktor zur weiteren Reduzierung im Zuge der Klimaveränderung und einer Normalverteilung um den Mittelwert, ergibt sich Gleichung 8. Die lineare Reduzierung des Witterungsfaktors erreicht in 2050 einen Höhepunkt von 0,048. Zum Vergleich in [121] wird von einer Reduzierung von 0,1 zwischen 2020 und 2050 ausgegangen. Allerdings ist in Gleichung 8 bereits eine Verringerung für die kürzliche Veränderung (0,924) integriert, die in [121] in 2020 0,97 beträgt. In Summe ergeben sich fast identische Werte.

²⁹Geothermie ist hier nicht mit Geothermie in Großanlagen für Fernwärme zu verwechseln. Letztere ist in der Fernwärme enthalten.

³⁰Vgl. -3 % bis -17 % für 2014 und 2018 verglichen mit dem vorherigen Jahr; siehe Abschnitt 3.1.

$$Witt(n) = 0.924 + 0.02 * randn - 0.0015 * (n - 3) \quad (8)$$

randn: Normalverteilung um 0 von (-3) bis (+3)

n: Jahr; 2018: n=3

Während Gleichung 8 die Witterungskorrektur im Betrachtungszeitraum gut widerspiegelt, wird von einer Beibehaltung des zufallsbasierten Terms abgesehen, da der Mittelwert im Betrachtungszeitraum als entscheidend angesehen wird und entsprechend untersucht werden sollte. In [13] wird ein höherer Einfluss des Klimawandels auf den Endenergiebedarf angenommen. Entsprechend könnten auch geringere Endenergiebedarfe erwartet werden als in den untersuchten Szenarien in dieser Arbeit.

Abweichung Modell

Um im Modell eine Abweichung von <1% der Endenergiesumme verglichen mit [2] zu erreichen, verbleibt noch eine Abweichung von 0,0685 bzw. 6,85%. Es könnte auch ein höherer Anteil bereits modernisierter Gebäude angenommen werden. Dies wird aber verworfen, da wie bereits erwähnt ein relativ hoher Anteil an modernisierten Altbauten integriert ist und eine weitere Erhöhung nicht mit Literaturquellen gerechtfertigt werden kann. Es wird davon ausgegangen, dass die Abweichung durch leerstehende und zumeist nicht beheizte Wohnungen entsteht. Mit einer Leerstandsquote von 8,2% in 2018 [52] und der Annahme, dass Teile der Heizlast z.B. in MFH durch angrenzende Wohnungen getragen werden müssen, ist die resultierende Abweichung nachvollziehbar. Die 6,85% werden als konstante Abweichung in das Modell integriert, da keine Variation der Leerstandsquote betrachtet wird.

3.2.1 Endenergie

Der zweite Teil der Kalibrierung wird durch einen Abgleich der Endenergiebilanzen pro Energieträger getätigt. Die aggregierten Nutzenergieverbräuche nach der Kalibrierung der Gesamtenergiebilanz werden mit der Ausgangsverteilung (siehe Abbildung 19) und den Jahresnutzungsgraden der WVA in eine Endenergiebilanz umgerechnet und mit der Endenergiebilanz (aus [2]) verglichen.

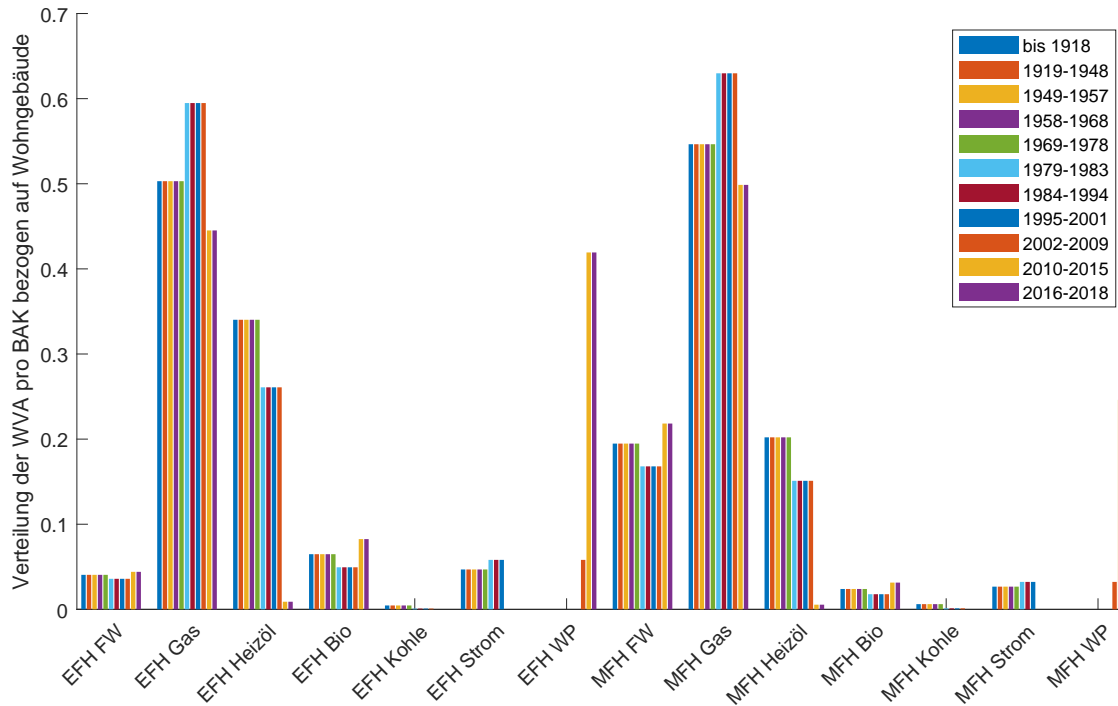


Abbildung 19: Ausgangsverteilung Wärmeversorgungsanlagen pro Baualterklasse im Modell für das Startjahr 2018 vor der Feinkalibrierung; vgl. Tabellen 8 & 9 (basierend auf eigenen Berechnungen & [36])

2. Kalibrierung Endenergie pro Energieträger (Feinkalibrierung):

Die Differenzen pro Energieträger/WVA werden als Zielwerte für ein nicht lineares Optimierungsproblem genutzt. Die Optimierungszielfunktion ist in Gleichung 9 gegeben. Die Variable x_i entspricht dabei der Abweichung von dem ursprünglichen Anteil eines Energieträgers in der jeweiligen Baualterklasse.

$$f(x_i) = \sum_{i=1}^{154} (x_i^2) \quad (9)$$

Das Ziel des Optimierers ist die Minimierung der Zielfunktion unter Einhaltung der Bedingungs-gleichungen. Für die Bedingungs-gleichungen werden 14 Ungleichungen und 22 Gleichungen erstellt. Die Ungleichungen entsprechen den oberen und unteren Grenzwerten für die Erreichung der Differenzen der Energiebilanzen. Die Gleichungen zwingen den Optimierer, dass die Verteilung pro Gebäudetyp und Baualterklasse jeweils in Summe immer 1 ergeben muss. Der Optimierer sucht eine Lösung, die den Bedingungen und in Summe der geringsten Abweichung von den 154 Ausgangswerten entspricht. Dass es eine Lösung des Gleichungssystem gibt, bei

der die Zielwerte exakt erreicht werden, ist unwahrscheinlich. Durch die Ungleichungen werden entsprechend Grenzwerte gegeben, die dem Optimierer einen geringen Spielraum lassen das System unter Einhaltung der Bedingungen zu lösen. Die Zielwerte der Optimierung und die Werte im Modell vor und nach der Optimierung sind in Tabelle 20 gegeben.

Tabelle 20: Endenergiebilanz der Feinkalibrierung; Zielwerte sowie Vergleich Werte Modell vorher und nachher

WVA	(AGEB)	Zielwert	Modell vorher	Modell nachher	$\frac{\Delta_{\text{nachher}}}{\text{Zielwert}}$
Fernwärme	179,0	179,0	163,5	179,0	0
Gas	857,3	857,3	941,7	857,3	0
Heizöl	440,6	440,6	430,4	440,6	0
Biomasse gesamt	242,0	242,0	241,1	242,0	0
davon WVA	-	80,5	79,6	80,5	0
Kohle	20,2	10	7,8	15,3	-0,53
Strom	83,7	83,7	57,3	83,0	<0,01
davon WP	-	23,55	8,4	22,8	0,03
Unterstützende					
Solarthermie	30,5	-	30,5	30,5	-
Geothermie & Umweltwärme	47,1	-	16,8	45,6	0,03
Σ Gesamt	1900,4 PJ	-	1897,6 PJ	1893,3 PJ	<0,01

Solarthermie ist eine unterstützende Energie und fällt entsprechend nicht als Hauptenergieträger für WVA an. Sie ist nicht in der Feinkalibrierung integriert. Geothermie und Umweltwärme sind indirekt durch die Integration der Wärmepumpen enthalten. Für Kohle wird angenommen, dass Kohle auch ebenfalls als Zusatzbrennstoff in Kaminen und in Einzelöfen genutzt wird. Deshalb wird der Zielwert für Kohle nur auf 10 PJ statt auf 20,2 PJ wie in der Endenergiebilanz nach [2] AGEB, gesetzt. Der Optimierer nutzt hier allerdings seinen „Spielraum“ und erreicht im Modell nachher dadurch Werte für Kohle die näher an der Endenergiebilanz nach [2] sind als der Zielwert. Die Summe der Endenergiebilanz verringert sich im Modell nachher, da der Anteil effizienter Heizungsanlagen steigt. Entsprechend sinkt die benötigte Endenergie für die identische Verbrauchsmenge für Raumwärme und Warmwasser.

Der Zielwert von 23,55 PJ für WP wird durch die gewählte JAZ des Bestands und den Wert für Geothermie und Umweltwärme in [2] bestimmt. Dies ist notwendig, da der genutzte Anteil Geothermie und Umweltwärme angegeben ist, die benötigte Strommenge nicht. Bei einer

durchschnittlichen JAZ von 2,5-3,5 ergeben sich 18,84-31,4PJ. Den Hochrechnungen in [14] nach wäre ein Stromverbrauch der Wärmepumpen im Bereich von ca. 16PJ und mehr zu erwarten. Dies deckt sich nur bei sehr hohen JAZ mit der Erwartung nach [2] und widerspricht den ableitbaren Zahlen aus [14], die eine niedrigere JAZ von 2,5-3 erwarten lassen. Eine JAZ von 3 für Bestandswärmepumpen ist dabei der Mittelweg zwischen den Werten aus den genannten Quellen und wird für die Berechnung des Zielwertes (23,55PJ) genutzt.

Das Ergebnis des Optimierungsschritts ist die Abweichungsmatrix, deren Werte in Abbildung 20 dargestellt sind. Mit der Abweichungsmatrix und der Ausgangsverteilung ergibt sich die kalibrierte Verteilung der WVA in Abbildung 21.

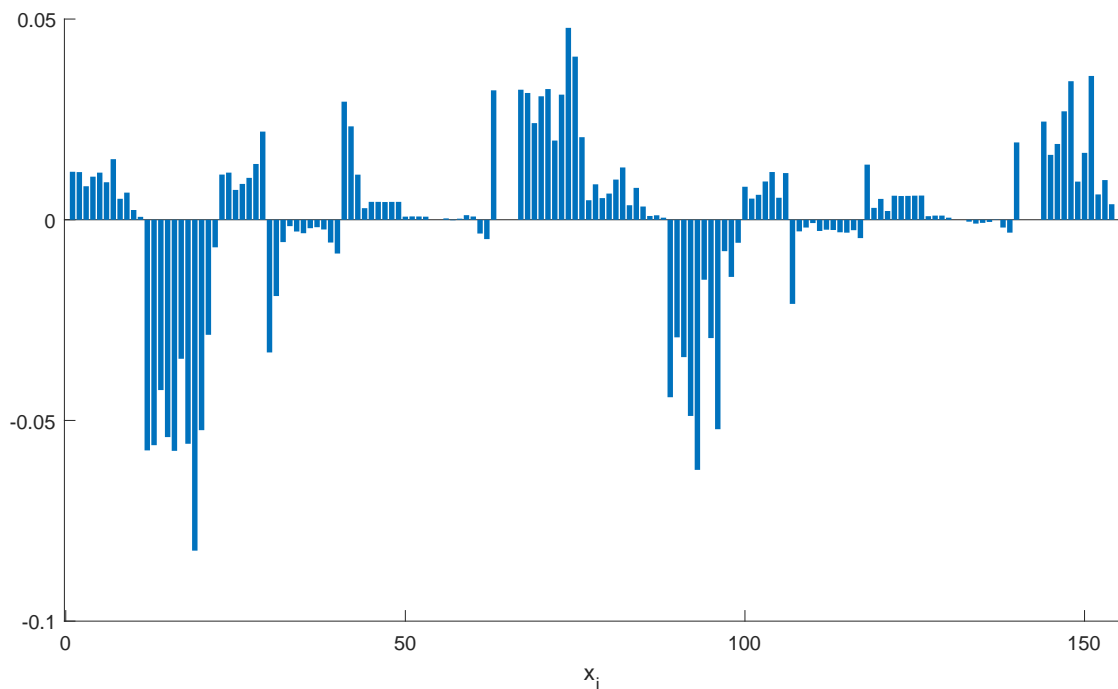


Abbildung 20: Abweichung der Verteilung Wärmeversorgungsanlagen pro Baualtersklasse in der Feinkalibrierung für 2018

Die Ergebnisse nach der Kalibrierung zeigen eine sehr gute Übereinstimmung mit den Werten nach [2]. Die Verteilung nach der Feinkalibrierung ist bis auf wenige Punkte auch schlüssig. Kritischer Punkt ist der Ausgangs- und Endwert der Wärmepumpen. Da der Zielwert deutlich höher ist, verteilt der Optimierer zusätzliche Wärmepumpenanteile nahezu gleichmäßig. Allerdings nur nahezu, da der Optimierer Baualtersklassen mit hohen Energiebedarfen bevorzugt.

Für diese kann der Optimierer mit geringeren Abweichungen höhere Ergebnisse erzielen. Dies ist bspw. für die Baualtersklasse 2010-2015 der Fall. Hier erhöht der Optimierer den Anteil über den der Baualtersklasse 2016-2018 (vgl. Abbildung 21). Zu erwarten wäre stattdessen ein geringerer Anteil für 2010-2015 verglichen mit 2016-2018, da der Anteil Wärmepumpen bei Neubauten kontinuierlich zugenommen hat. Diese Mechanik kann entsprechend auch bei anderen Energieträgern auftreten. Inwiefern dies zu einem Fehler führt oder näher an der Realität ist, kann nur bei den neueren Baualtersklassen, bei denen noch keine Heizungsmodernisierung zu erwarten ist, beurteilt werden. In diesem Fall kann die Verteilung der im Neubau installierten Anlagen als Referenz dienen. Aber auch hierfür gilt, die Anzahlen beziehen sich auf installierte Systeme und nicht den Anteil am Endenergiebedarf. Daneben beziehen sich die Zahlen auf alle Neubauten und werden nicht nach EFH und MFH differenziert. Bei einem Vergleich der neueren Baualtersklassen (2002-2018) ist nur eine eindeutige Abweichung mit zu hohen Anteilen für Wärmepumpen in den Baualtersklassen 2010-2015 und 2016-2018 ersichtlich. Davon abgesehen ist die Verteilung adäquat (vgl. Abbildung 14 oder [14]).

Zusammenfassend ist festzuhalten, dass die genutzte Methodik zur Transformation der Wärmeversorgungsverteilung maßgeblich von einer guten Ausgangsverteilung abhängig ist. Die kalibrierte Verteilung stellt eine sehr gute Grundlage für aggregierte nationale Berechnungen, wie End- und Primärenergiebilanzen sowie auch eine THG-Bilanz, dar.

3.2.2 Primärenergie

Da die Endenergiebilanz in die unterschiedlichen Energieträger aufgeteilt ist, kann die kalibrierte Bilanz im Modell mit Primärenergiefaktoren (nicht erneuerbarer Anteil) direkt in eine Primärenergiebilanz umgerechnet werden. Hierzu werden die Primärenergiefaktoren wie in den Tabellen 21 und 22 genutzt. Im Modell wird Gas mit Erdgas gleichgesetzt, da leitungsgebundenes Erdgas dominierend ist. Die Faktoren für Fernwärme und Strom sind von den eingesetzten Erzeugungsanlagen abhängig und variieren entsprechend im Verlauf des Betrachtungszeitraums. Die Primärenergiebilanz am Anfang des Betrachtungszeitraums ist in Abbildung 22 gegeben.

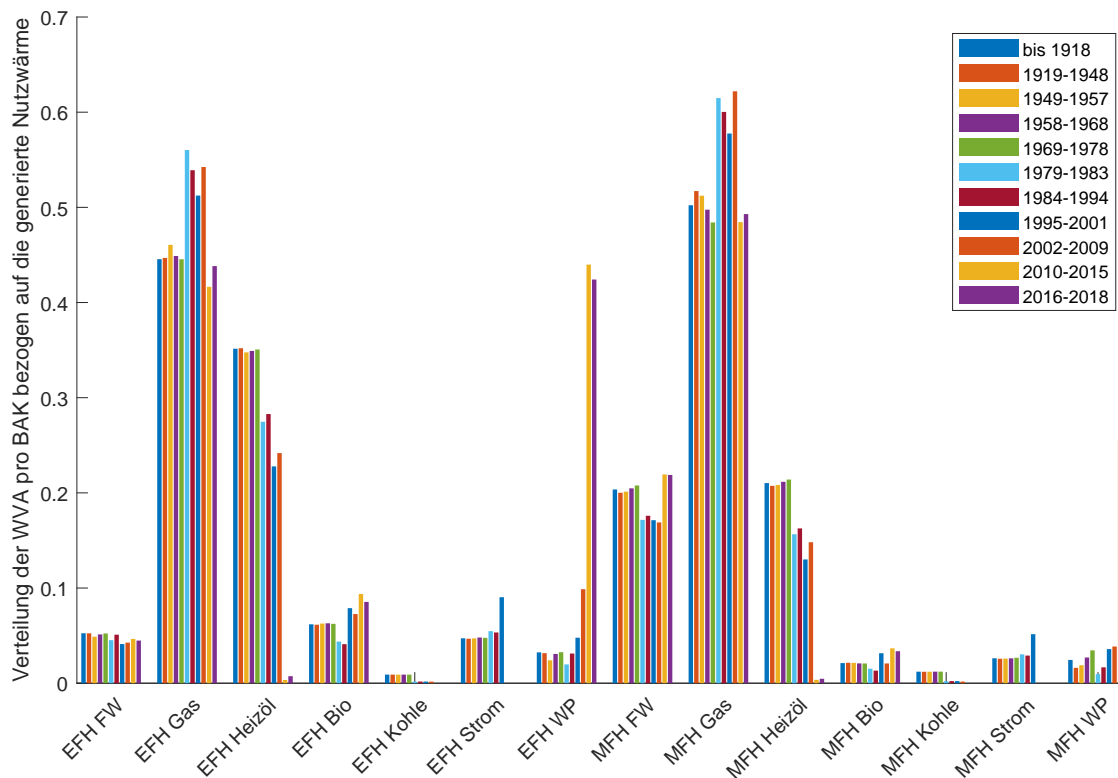


Abbildung 21: Verteilung Wärmeversorgungsanlagen pro Baualtersklasse im Modell für das Startjahr 2018 nach Feinkalibrierung

Tabelle 21: Primärenergie- und Emissionsfaktoren (in CO_2 -Äquivalenten), (Quelle: DIN V 18599-1:2018-09)

	Primärenergiefaktor [-]	Emissionsfaktor [g/kWh]
Erdgas	1,1	240
Heizöl	1,1	310
Holz	0,2	40
Biogas/Bioöl	0,4	120/190
Steinkohle	1,1	400

3.2.3 Treibhausgasemissionen

Die Treibhausgasemissionen werden mit Emissionsfaktoren (siehe Tabellen 21 und 22) für CO_2 -Äquivalente analog zur Primärenergiebilanz berechnet. Es ergibt sich eine Gesamtmenge von 122,3 Mio. t pro Jahr für 2018. Die Emissionen beziehen sich dabei auf Raumwärme und Warmwasser für Wohngebäude inklusive indirekter Emissionen. Verglichen mit 129 Mio. t in [82] für 2015 und 154 Mio. t pro Jahr in 2017 in [123] (inklusive Verbrennungsemissionen durch Holz; im Modell entsprechend 148,5 Mio. t). Die Treibhausgasemissionen im Modell sind damit vergleich-

Tabelle 22: Primärenergie- und Emissionsfaktoren (in CO_2 -Äquivalenten) für Strom & Fernwärme im Verlauf des Betrachtungszeitraums; *:interpoliert aus 2008/2020; **: Wert aus DIN V 18599-1; (basierend auf [78])

Fernwärme	Primärenergiefaktor [-]	Emissionsfaktor [g/kWh]
2018*	0,93	204
2020	0,92	203
2030	0,85	195
2040	0,72	145
2050	0,55	90
Strom	Primärenergiefaktor [-]	Emissionsfaktor [g/kWh]
2018	1,8**	550**
2020	1,8**	550**
2030	1,25	274
2040	0,77	165
2050	0,44	79

bar mit Literaturwerten, was aufgrund der Nutzung der bereits kalibrierten Endenergiebilanz als Basis zu erwarten war. Der Ausgangszustand im Modell wird damit als kalibriert und validiert angesehen.

3.3 Modellierung der Entwicklung des Wohngebäudebestands

Die im folgenden Abschnitt dargestellten und erläuterten Grundgleichungen des Modells wurden in [6] publiziert.

3.3.1 Wohnflächenentwicklung

Nachdem der Ausgangszustand in den vorherigen Abschnitten beschrieben und im Modell integriert ist, wird als nächstes die weitere zeitliche Entwicklung des Wohngebäudebestands modelliert. Die Wohnflächenentwicklung wird hierzu als grundlegende Variable genutzt. Der Verlauf der Wohnflächenentwicklung soll dabei in Abhängigkeit der Bevölkerungsentwicklung modelliert werden. Für die Bevölkerungsentwicklung wird die Bevölkerungsvorausberechnung aus [50] übernommen. Eine proportionale Beeinflussung der Wohnfläche durch die Bevölkerungsentwicklung kann den vergangenen Entwicklungen nicht entnommen werden. Dafür ist

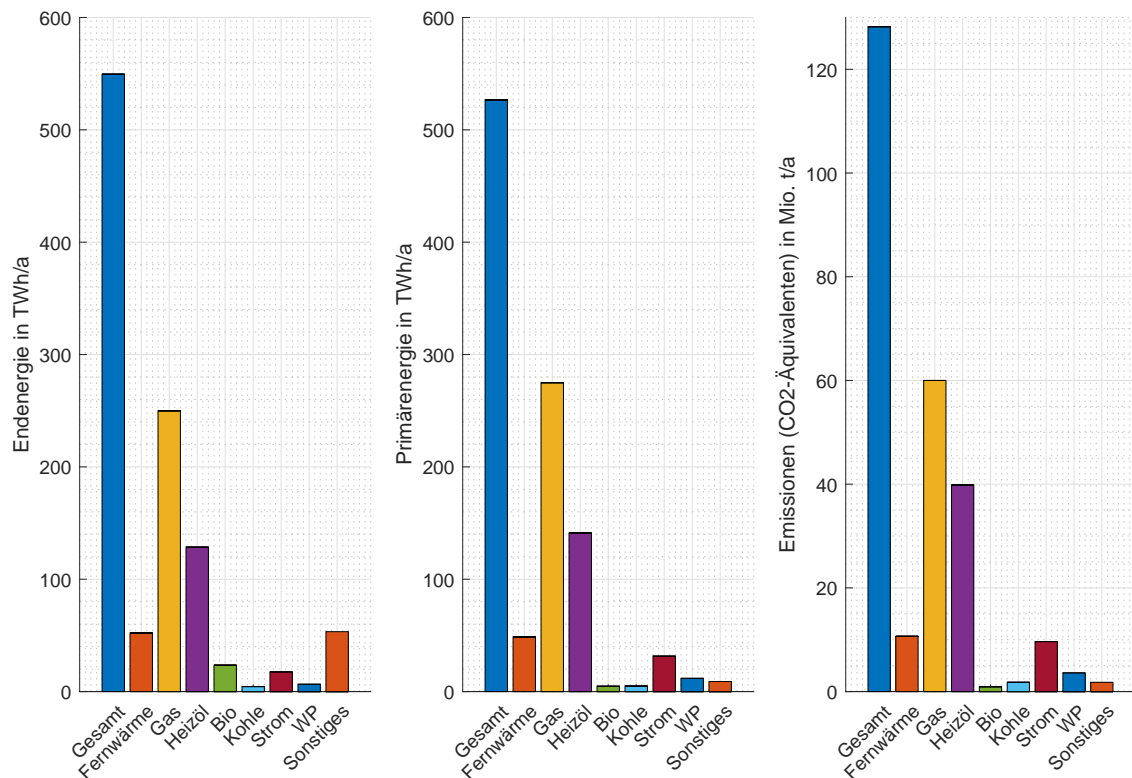


Abbildung 22: End-, Primärenergie und THG-Bilanz für Raumwärme und Warmwasser in deutschen Wohngebäuden zum Beginn des Betrachtungszeitraums (2018) im Modell

das Baugeschehen nach der Wiedervereinigung und dem darauffolgenden Bauboom zu dynamisch.

Aus den vergangenen Entwicklungen (siehe Abschnitt 2.3.4 & Abbildung 12) wird abgeleitet, dass der Bevölkerungseinfluss verringert und verzögert einfließt. Daneben zeigt sich ein träges Verhalten der Wohnflächenentwicklung und ein grundlegendes Wachstum der Wohnflächen. Letzteres geschah auch bei Bevölkerungsrückgang und war geprägt durch höhere Anteile von EFH, die höhere Wohnflächen pro Person aufweisen.

Der Einfluss der Bevölkerungsentwicklung wird verzögert und mit einem Faktor (pgf_n) in die Funktion integriert. Eine leichte Verzögerung wird durch die Nutzung der Bevölkerungsdifferenzen der letzten drei Jahre integriert. Ein Grundwachstum der Wohnflächen, also eine steigende Wohnfläche pro Person, wird durch bg_n berücksichtigt (vgl. Gleichung 10). Werden pgf_{2018} zu 0,75 und bg_{2018} zu 0,7 gesetzt, ergibt sich eine Fortführung des Trends in 2018 (hohe Neubau-

raten trotz geringen Bevölkerungswachstums).

$$wfl(n) = bg_n + pgf_n * \frac{1}{3} * \left(\frac{B_{n-2} - B_{n-3}}{B_{n-3}} + \frac{B_{n-1} - B_{n-2}}{B_{n-2}} + \frac{B_n - B_{n-1}}{B_{n-1}} \right); [\%/a] \quad (10)$$

Wird Gleichung 10 mit konstanten Werten für pgf_n (0,75) und bg_n (0,7) auf den Zeitraum 1995-2018 angewendet, entspricht der Anstieg der Wohnfläche dem tatsächlichen Anstieg abzüglich der statistischen Anpassung im Jahr 2010 (-200.000 m²) und der Auswirkungen des Baubooms nach der deutschen Wiedervereinigung (-100.000 m²). Darüber hinaus sind unterschiedliche Trends vor allem zwischen 2010-2018 zu erkennen. Die Prognose ist aufgrund der starken Bevölkerungsentwicklung stärker ausgeprägt. Der reale Verlauf ist wesentlich träger und entspricht einer langsamen Entwicklung der Prognosewerte. Werden die Effekte des Baubooms (Jahre 1995-2000) und der statistischen Bereinigung (2010) herausgerechnet, ergeben sich folgende Durchschnittswerte:

- **Gleichung 10: 0,74 %/a** (2001-2018)
- **realer Verlauf: 0,72 %/a** (2001-2018 ohne 2010)

Für die Jahre 2016-2018 wird die tatsächliche Wohnflächenentwicklung genutzt (vgl. Tabelle 11). Die Bevölkerungsprognose wird über die dekadischen Stützpunkte (2020, 2030, ...) geglättet. Die Werte der Faktoren pgf_n (0,75) und bg_n (0,7) werden im Betrachtungszeitraum konstant gehalten. Die geglättete Bevölkerungsprognose und die daraus resultierende prozentuale Wohnflächenentwicklung ist in Abbildung 23 dargestellt.

Die Ergebnisse der Wohnflächenentwicklung aus Gleichung 10 (siehe Abbildung 23) sind vergleichbar mit den Annahmen in [13] (2020: 0,70 %/a, 2030: 0,62 %/a, 2045: 0,19 %/a) auf Basis von Vorgaben des BBSR.

Es wird davon ausgegangen, dass die Wohnflächenentwicklung damit hinreichend gut modelliert ist. Auch wenn die Wohnflächenentwicklung letztlich wie auch Neubau, Rückbau oder das Verhältnis von EFH zu MFH, ein Ergebnis von wechselnden demographischen, kulturellen, rechtlichen, bautechnischen und ökonomischen Rahmenbedingungen ist.

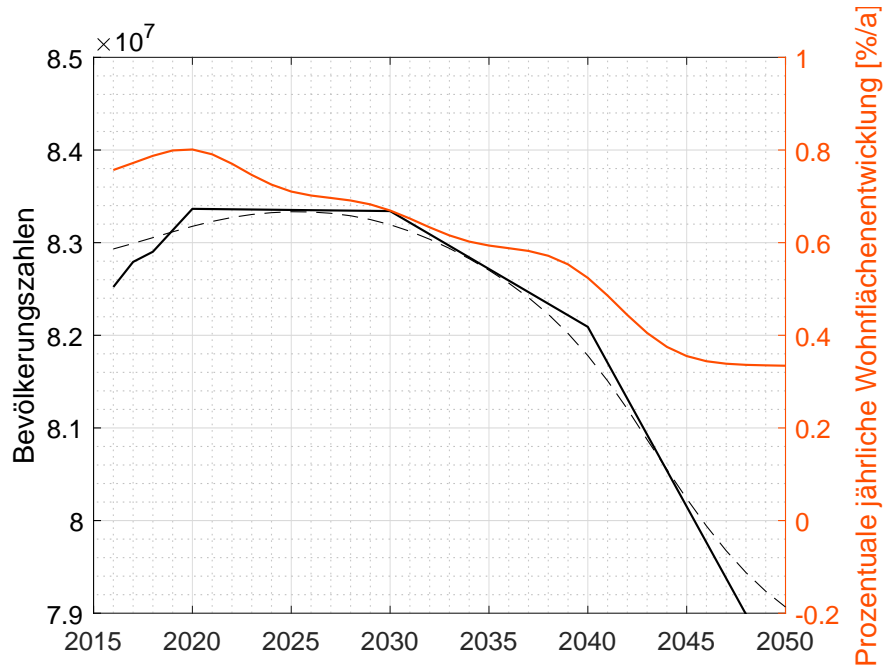


Abbildung 23: Vergleich der Bevölkerungs- und Wohnflächenentwicklung im Modell

3.3.2 Neubau & Rückbau

Die Modellierung des Neu- und Rückbaus basiert auf der Wohnflächenentwicklung. Daneben variiert das Verhältnis von Neubau zu Rückbau. In Abschnitt 2.3.3 zeigt sich, dass das Verhältnis Rückbau zu Neubau in der Vergangenheit sehr gut mit dem EFH Anteil im Neubau korrelierte. Dies wird für die Modellierung des Neu- und Rückbaus genutzt (siehe Gleichungen 11 & 12).

$$Neub(n) = \frac{WFL_{neu}(n)}{1 - \frac{EFH_{neu}(n)}{10 * (1 - EFH_{neu}(n))}}; [m^2/a] \quad (11)$$

$$Rckb(n) = \frac{EFH_{neu}(n)}{10 * (1 - EFH_{neu}(n))} * Neub(n); [m^2/a] \quad (12)$$

Das Verhältnis EFH zu Neubau wird dabei ausgehend von dem derzeitigen Verhältnis ebenfalls in Abhängigkeit der Wohnflächenentwicklung modelliert. Die Gleichung 13 ist dabei nur für den Erwartungsbereich von $wfl(n)$ im Betrachtungsbereich ausgelegt.

$$EFH_{neu}(n) = 1 - 0,78 * wfl(n); [-/-] \quad (13)$$

Die Ergebnisse der Wohnflächenmodellierung sind in Abbildung 24 gegeben.

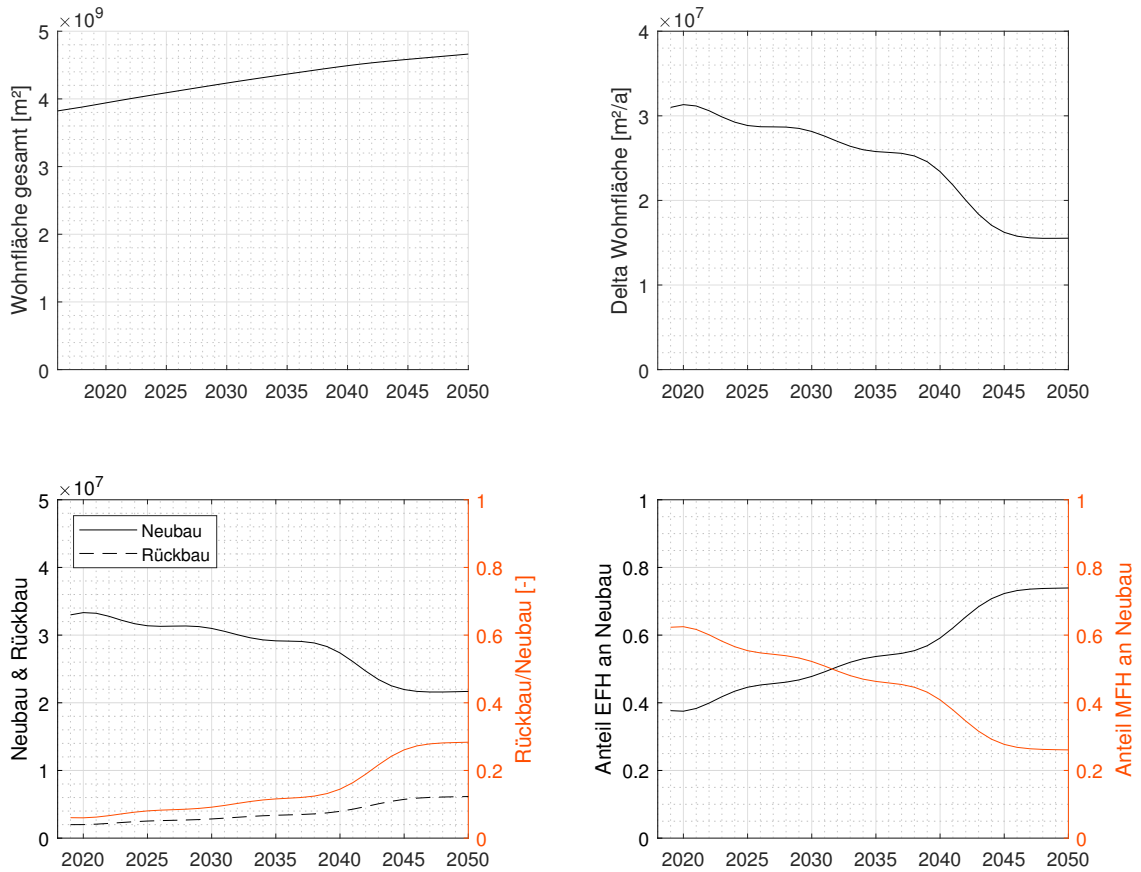


Abbildung 24: Übersicht der Wohnflächenparameter im Trendszenario im Modell

3.3.3 Modernisierungsaktivitäten

Ist der Sanierungszyklus Treiber der Modernisierungsraten, so ergeben sich Modernisierungsraten in Abhängigkeit der Lebensdauer. In diesem Fall wird eine repräsentative VM-Rate durch die wiederkehrenden Zyklen der BT-Modernisierung nach dem jeweiligen Einschwingverhalten jüngerer Baualtersklassen erwartet. Rückt die Reduzierung der Energiekosten, ggf. verbunden mit staatlichen Anreizen, als Anlass der Modernisierung in den Vordergrund, kann hierdurch die Modernisierungsrate abweichend vom Sanierungszyklus des Bauteils erhöht werden. Ergibt sich kein erneuter Grund die Modernisierung eines Bauteils abweichend vom Sanierungszyklus vorzuziehen, fällt die Modernisierungsrate wieder in den Sanierungszyklus zurück. Ziel ist die

Modellierung der Modernisierungsaktivitäten hin zu vollmodernisierten Gebäuden unter der Annahme, dass nach der energetischen (Voll-)Modernisierung keine weiteren energetischen Verbesserungen im Betrachtungszeitraum stattfinden.

Bei Verwendung einer VM-Rate in einer Modellierung des Wohngebäudebestand muss bedacht werden, dass einzelne Bauteile einer Baualtersklasse und eines Gebäudetyps ggf. eine Vollmodernisierung erreichen, bevor alle Bauteile dieser Gebäudegruppe modernisiert sind. Diese haben zuvor die VM-Rate gesteigert, führen danach aber theoretisch zu keiner energetischen Verbesserung mehr. Bei Bauteilen mit vergleichsweise kurzen Lebensdauern (z.B. Fenster), ist bei längeren Betrachtungszeiträumen eine mehrfache Modernisierung zu erwarten. Hierdurch können solche Maßnahmen nach Erreichung der Vollmodernisierung die effektive VM-Rate (Modernisierungen mit energetischer Verbesserung) verzerren. Durch eine Modellierung der Modernisierungsraten auf Bauteilebene (BT-Modernisierungsrate) kann dies umgangen werden. Bei letzterem müssen die Einsparungen von Teilsanierungen, da diese nicht durch TABULA abgedeckt werden, durch eigene Modellierungen bestimmt werden. Es wird eine Modellierung mit VM-Raten angestrebt. Die Berechnungsformeln sollen aber ebenso auf BT-Modernisierungsraten anwendbar sein.

Entwicklung der Modernisierungsfunktion

Die Modellierung der Modernisierungsaktivitäten wird maßgeblich durch zwei Faktoren, die jeweils pro Gebäudetyp und Baualtersklasse bestimmt werden, durchgeführt. Der erste Faktor spiegelt den Sanierungsbedarf einer Baualtersklasse wieder und wird mit Gleichung 14 berechnet. Der Sanierungsbedarf stellt damit keine Ausfallwahrscheinlichkeit bzw. Bauteilversagen wie bei einer Weibullverteilung dar. Stattdessen soll mit dem Sanierungsfaktor der Mehrwert einer Sanierung simuliert werden. Wird die Lebensdauer überstiegen, wächst der Faktor durch die quadratische Form schnell an und spiegelt damit die steigende Notwendigkeit einer Sanierung wider. Die Lebensdauer (vgl. LD in Gleichung 14) wird aufgrund der Betrachtung von Vollmodernisierungsäquivalenten zu 55 Jahre gesetzt und soll damit die erwartete Lebensdauer des langlebigsten Bauteils, der Außenfassade, darstellen. Der Sanierungsfaktor der zwei ältesten Baualtersklassen (bis einschließlich BJ 1948) wird unter der Prämisse, dass viele dieser Gebäude in der Vergangenheit auch ohne Modernisierung saniert wurden, reduziert.

$$sanf_{i,j}(n) = \frac{1}{LD^2} * (n - Baujahr_{i,j})^2 \quad (14)$$

Neben dem Sanierungsbedarf wird ein Faktor für den Einfluss ökonomischer Rahmenbedingungen erstellt. Dieser Ökonomiefaktor ($ecof_{i,j}(n)$) beeinflusst die Geschwindigkeit mit dem Modernisierungstätigkeiten durchgeführt werden. Er wird zu Beginn für die Übernahme der derzeitigen ökonomischen Rahmenbedingungen zu 0,9 gesetzt, d.h. die Geschwindigkeit wird reduziert und weniger Modernisierungen pro Jahr angestoßen, als es aufgrund des Sanierungsfaktors theoretisch sinnvoll wäre. In Kombination sind diese die bestimmenden Faktoren für die Modernisierungsaktivitäten pro Gebäudeklasse und Baualtersklasse. Die jeweilige VM-Rate wird durch Gleichung 15 bestimmt. Die weiteren Faktoren LDf , \widehat{mod}_i und $pot_{i,j}(n)$ stehen für einen Lebensdauerfaktor, die erwartete Modernisierungsrate und den potenziellen Anteil noch nicht modernisierter Gebäude in der Baualtersklasse.

$$mod_{i,j}(n) = LDf * \widehat{mod}_i * sanf_{i,j}(n) * ecof_{i,j}(n) * pot_{i,j}(n) \quad (15)$$

mit:

i= 1:[EFH], 2:[RH], 3:[kl. MFH], 4:[gr. MFH]

j= 1-12 jeweilige BAK

Über den Lebensdauerfaktor (LDf , siehe Gleichung 15 & Abbildung 25) kann der Anteil modernisierter Gebäude bei Erreichen der Lebensdauer justiert werden. Bei $LDf=2$ sind bei $LD=55$ Jahre nach Ablauf von 55 Jahren 48 % modernisiert und das Maximum der Modernisierungsfunktion befindet sich ebenfalls bei der mittleren Lebensdauer. Die erwartete Modernisierungsrate \widehat{mod}_i dient im Trendszenario der Gewichtung von EFH/MFH und wird mit Zahlenwerten entsprechend den durchschnittlichen aktuellen Modernisierungsraten der Altbauten in das Modell integriert. Die theoretisch erwartete Modernisierungsrate wird in Gleichung 16 definiert.

$$\begin{aligned} \widehat{mod}_i &= \frac{1}{LD} \\ \widehat{mod}_{i=1} &= \widehat{mod}_{i=2} = 0,01268 \quad | \quad (Trendszenario) \\ \widehat{mod}_{i=3} &= \widehat{mod}_{i=4} = 0,01615 \quad | \quad (Trendszenario) \end{aligned} \quad (16)$$

Wird die erwartete Modernisierungsrate für das Trendszenario ebenfalls berechnet, ergibt sich ein Zahlenwert von 0,01818 und der Einfluss der realen Modernisierungsraten wäre dem Ökonomiefaktor zuzusprechen. Der Ökonomiefaktor würde entsprechend folgende Werte annehmen:

- $ecof_{1,j}(2018) = ecof_{2,j}(2018) = 0,628$
- $ecof_{3,j}(2018) = ecof_{4,j}(2018) = 0,800$

Der verbleibende Faktor $pot_{i,j}(n)$ bildet die potenziell für eine Modernisierung zur Verfügung stehenden Gebäude pro Gebäudetyp und Gebäudealtersklasse ab. Entsprechend lässt sich dieser auch über das Integral der Modernisierungsfunktion und den bereits modernisierten Anteil zu Beginn des Betrachtungszeitraums beschreiben (siehe Gleichung 17).

$$pot_{i,j}(n) = (1 - MOD_{2018}) - \sum_{k=2019}^{n-1} mod_{i,j}(k) \quad (17)$$

Mathematischer Hintergrund

Mit dem Lebensdauerfaktor ist die Möglichkeit gegeben, den Anteil der Modernisierungen nach Ablauf der Lebensdauer einzustellen. In Abbildung 25 ist die Kennlinie des Lebensdauerfaktors dargestellt. Wird der Lebensdauerfaktor auf 2 eingestellt, sind entsprechend bei Ablauf der Lebensdauer 48,1 % modernisiert (siehe Datenpunkt in Abbildung 25). Da der Lebensdauerfaktor identisch wie der Ökonomiefaktor $ecof_{i,j}$ in die Gleichung einfließt, kann über die Kennlinie auch die Auswirkung des Ökonomiefaktors bestimmt werden.

Durch den Einfluss des Ökonomiefaktors werden die Modernisierungsraten entweder verringert oder beschleunigt. Die Ergebnisse der Modernisierungsfunktion verändern sich dabei, als würde eine neue Lebensdauer in die Funktion eingesetzt. Die theoretische neue Lebensdauer unter Einbezug des Ökonomiefaktors kann mit Gleichung 18 berechnet werden.

$$LD_{ecof} = \sqrt[3]{\frac{LD^3}{ecof}} \quad (18)$$

Die Kombination der verschiedenen Faktoren mit einer sukzessiven Reduktion des verbleibenden Anteils von nicht modernisierten Gebäuden ($pot_{i,j}(n)$ siehe Gleichung 15) ergibt eine Art

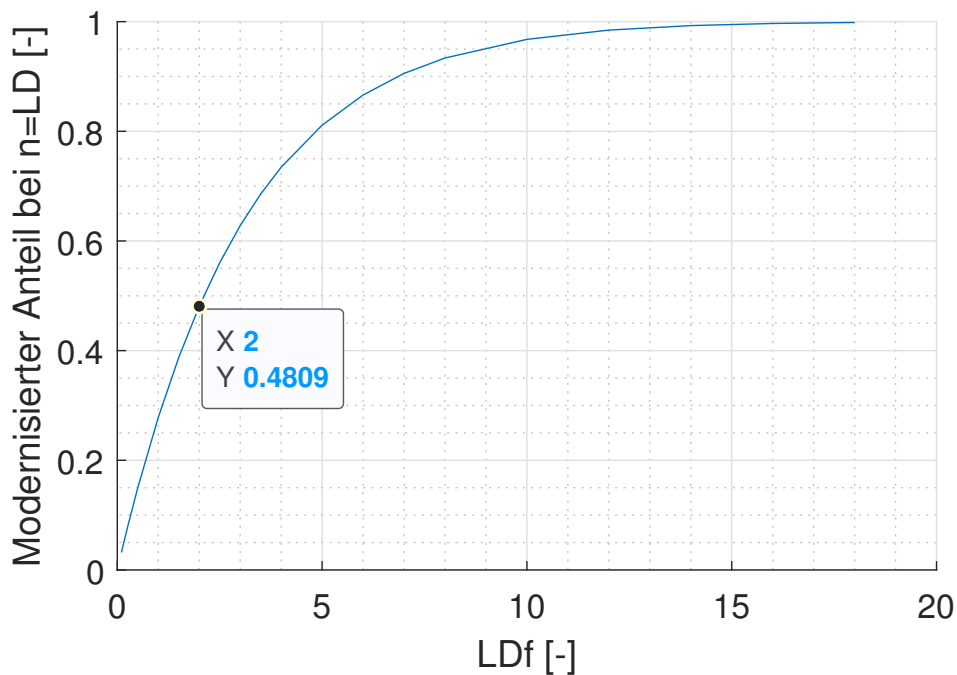


Abbildung 25: Kennlinie des Lebensdauerfaktors (LDf)

flache Normalverteilung mit einem Höchstwert von ca. 0,0189 bei 55 Jahren ($LDf=2$, $LD=55$, $\widehat{mod}_i=0,01818$, $ecof_{i,j}=1$, vgl. Datenpunkt Abbildung 26). Im Trendszenario wird der Höhepunkt durch die niedrigen Faktoren für \widehat{mod}_i und $ecof_{i,j}$ zu 59,5 - 64 Jahren verschoben. Dies kann den Ergebnissen des Modells entnommen oder auch durch das Einsetzen der effektiven Ökonomiefaktoren für das Trendszenario durch Gleichung 18 berechnet werden.

In Abbildung 26 sind Ergebnisse der Modernisierungsfunktion bei einer Variation der Lebensdauer und in Abbildung 27 für eine Variation des Lebensdauerfaktors dargestellt. Es wird ersichtlich, dass sich die gleichen Formen der resultierenden Funktionsergebnisse durch unterschiedliche Kombinationen von Lebensdauerfaktor und Lebensdauer einstellen lassen. Die Beziehung zwischen Lebensdauerfaktor und Lebensdauer ist analog zur Beziehung von Ökonomiefaktor zur Lebensdauer (siehe Gleichung 18).

In Abbildung 28 ist die Verteilungsfunktion der Modernisierungsfunktion bei Betrachtung von zwei Vollmodernisierungen pro Gebäude dargestellt. Während der untere blaue Bereich den Anteil der ersten Vollmodernisierung darstellt, zeigen die weiteren Graphen die jeweilige zweite Vollmodernisierung. Die Anteile der Gebäude (jeweils der vollmodernisierte Anteil aus einem

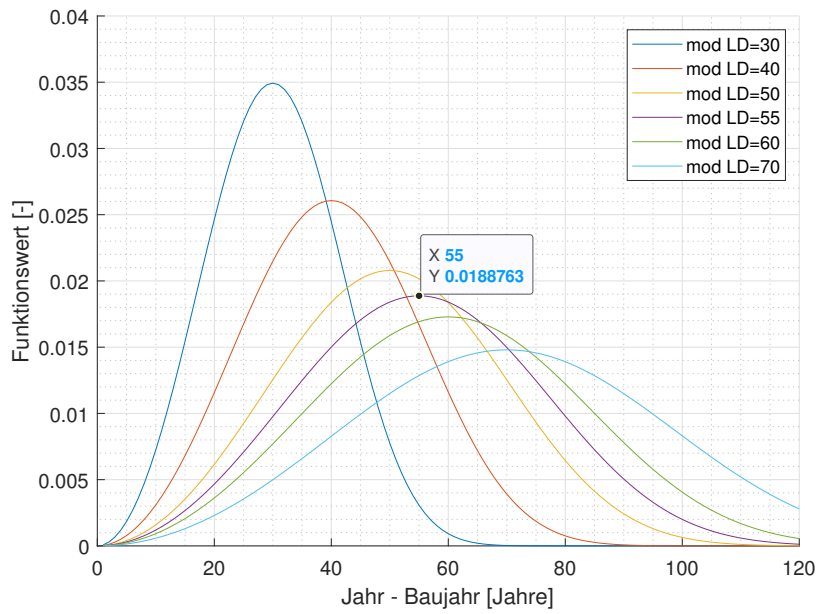


Abbildung 26: Sensitivitätsanalyse Lebensdauer; $LDf=2$, $ecof=1$

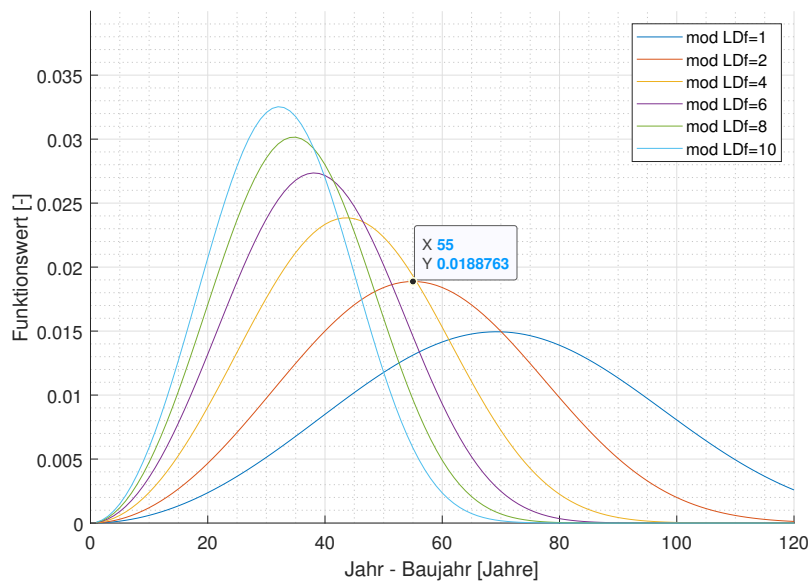


Abbildung 27: Sensitivitätsanalyse Lebensdauerfaktor; $LD=55$, $ecof=1$

Jahr) durchlaufen ab der ersten Vollmodernisierung wiederholt die Modernisierungsfunktion. Die vollständige zweite Modernisierung werden 100 % der Gebäude bei gegebenen Parameter-einstellungen erst ca. 200 Jahre nach dem jeweiligem Baujahr erreichen.

Darüber hinaus zeigt Abbildung 28, dass die vorherige maximale Modernisierungsrate (Steigung

bei 55 Jahren, ca. \widehat{mod}_i) verstetigt wird und tendenziell bei Nichtbegrenzung der betrachteten Vollmodernisierung zu einer mittleren Modernisierungsrate wird. Dies würde zu der Annahme passen, dass bei einer Lebensdauer von x Jahren die Modernisierungsrate nach einem Einschwingverhalten einen Funktionswert von $1/x$ erreichen sollte. Die in Abbildung 28 dargestellte Verteilungsfunktion erreicht ab dem Jahr 32 ($F(32+55)-F(32)$) bis Jahr 49 über einen Zeitraum von 55 Jahren Werte ≥ 1 . Damit werden nach dem Einschwingverhalten nach 55 Jahren durchschnittlich bei einer Anzahl y von Gebäuden auch y Vollmodernisierungen durchgeführt. Dabei werden bei einigen Gebäuden innerhalb dieses Zeitraums zwei Vollmodernisierungen durchgeführt und bei manchen keine. Auf einen Beweis, dass die resultierende durchschnittliche Modernisierungsrate der erwarteten Modernisierungsrate bei der Nichtbeschränkung der Modernisierungen und des Betrachtungszeitraums entspricht, wird verzichtet.

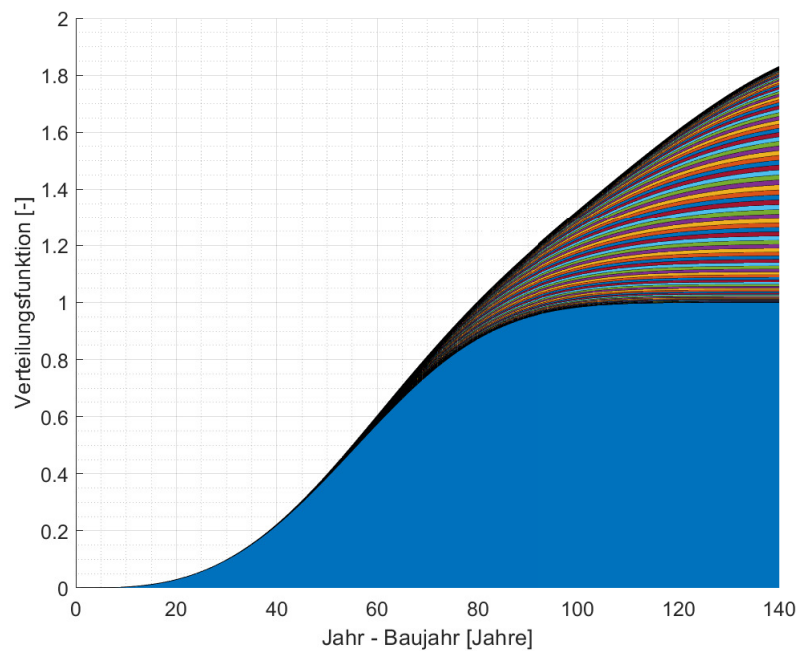


Abbildung 28: Verteilungsfunktion bei Betrachtung von zwei Vollmodernisierungen

Trendszenario

Die Vollmodernisierungsraten die sich im Modell für die verschiedenen Baualtersklassen und die durchschnittliche gesamt VM-Rate ergeben, sind in Abbildung 29 dargestellt. Das Ergebnis für einen Ökonomiefaktor von 0,9 ist exakt im Erwartungsbereich. Dies resultiert einerseits aus der Reduzierung der Vorkriegsbaualtersklassen und der Nutzung der erwarteten Modernisierungsraten in Altbauten für EFH und MFH durch $\widehat{mod}_{i,j}$.

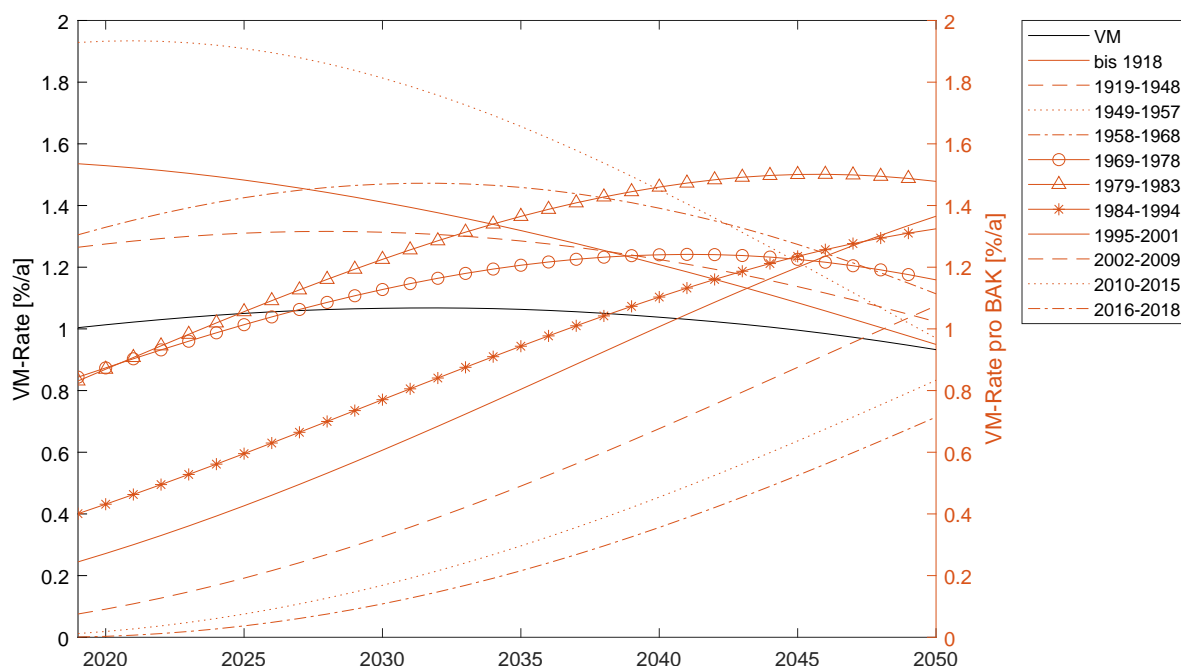


Abbildung 29: VM-Raten gesamt und pro BAK im Modell; die VM-Raten beziehen sich jeweils auf die Gesamtmenge der BAK bzw. den gesamten Wohngebäudebestand inklusive Neubau

Durch die geringeren Vorfaktoren ($\widehat{mod}_{i=1/2} = 0,01268$ & $\widehat{mod}_{i=3/4} = 0,01615$) werden die Modernisierungsraten reduziert, die Kurven flacher und entsprechend ein leichter Sanierungsstau simuliert. Im Modell wird der jeweilige Höhepunkt der Modernisierungsraten für die Baualterklassen so mit einigen Jahren Verzögerungen (59,5-64 statt 55 Jahre) erreicht. Durch die reduzierten VM-Raten, verglichen mit einem theoretischen Sanierungszyklus bestimmt durch die Lebensdauer, steigert sich der Einfluss des Sanierungsfaktors. D.h. bei reduzierter Modernisierungsgeschwindigkeit, wird vermehrt aus Gründen der Sanierungsnotwendigkeit modernisiert. Bei erhöhten Geschwindigkeiten wird durch den Ökonomiefaktor eine Modernisierung vermehrt vorgezogen.

In der Modellierung ergibt sich durch die steigende Anzahl sanierungsbedürftiger Gebäude eine leichte Steigerung der Vollmodernisierungsrate bis zu einem Höchstwert von 1,068 % im Jahr 2032. Die VM-Rate gesamt bezieht sich dabei jeweils auf die Gesamtmenge des Wohngebäudebestands inklusive der neu errichteten Gebäude. Entsprechend resultiert eine nahezu gleichbleibende VM-Rate in steigenden absoluten Zahlen. Der Höchstwert in 2032 ist ein Re-

sultat der hohen Anzahl von Gebäude aus der Nachkriegszeit. Diese Gebäude werden zwar bereits saniert und modernisiert, im Modell erreichte bis 2019 allerdings nur die Baualtersklasse 1949-1957 den Höchststand der Modernisierungsaktivität. Da für die Altbauten vor 1978 der gleiche Modernisierungsgrad von 33,5% angenommen wird (siehe Abschnitt 3.1), ergeben sich von der Normalverteilung abweichende Anteile von noch potenziell zu modernisierenden Gebäude ($pot_{i,j}(n)$). Entsprechend ist der Maximalwert für die Baualtersklasse 1949-1957 (siehe ca. 1,9%/a in Abbildung 29) erhöht, da ein geringerer Anteil bereits modernisiert angenommen wird als bei einem normalen Verlauf beim Höchstwert der Fall wäre. Bei den Gebäuden aus der Vorkriegszeit würde sich dies entsprechend noch stärker zeigen. Dies wird durch die bereits erwähnte Reduzierung des Sanierungsfaktors für diese Baualtersklassen unterdrückt. Umgekehrtes gilt für die Baualtersklasse 1969-1978 in der mit den angenommenen 33,5% bereits ein höherer Anteil als zu erwarten modernisiert ist.

Die Modernisierungsraten der einzelnen Baualtersklassen sind ebenfalls vergleichbar mit den zu erwartenden Modernisierungsraten. In 2.3.5 Modernisierungsraten beim Wärmeschutz werden auf Basis der Studie in [36] für die Baualtersklassen bis 1978 eine VM-Rate von 1,43%/a und für Baualtersklassen zwischen 1979-1994 von 0,83%/a berechnet. Die VM-Raten aus dem Modell bewegen sich für die entsprechenden Baualtersklassen bis 1978 in 2018 zwischen 0,84-1,93%/a und für die Baualtersklassen 1979-1994 zwischen 0,4-0,83%/a (vgl. Abbildung 29).

In [13] wird eine Lebensdauer von 50 anstatt 55 Jahren angesetzt. Wird dies im Modell ebenfalls getan, ergeben sich entsprechend höhere Modernisierungsraten. Um den Ausgangszustand in einen erwarteten Bereich zu kalibrieren, müsste dann der Ökonomiefaktor auf 0,75 reduziert werden. Die Ergebnisse sind mit diesen Einstellungen nahezu identisch zu denen in Abbildung 29. Tabelle 23 zeigt Variationen der Lebensdauer (LD), die ca. 1%/a VM-Rate in 2019 erzielen und auch zu sehr ähnlichen Verläufen im Betrachtungszeitraum führen. Die entsprechenden Modernisierungsraten sind im Anhang dargestellt (siehe Abbildungen 60, 61 & 62 im Anhang). Tabelle 23 zeigt darüber hinaus auch die Auswirkungen veränderter Lebensdauern ohne entsprechende Anpassung von eco_f auf die VM-Rate. Die Nutzung von 50-55 Jahren scheint sehr plausibel auch in Kombination mit den reduzierten Ökonomiefaktoren von 0,75-0,9. Das Modell zeigt damit ein sehr robustes Verhalten. Eine Lebensdauer von 55 Jahren und der entsprechende Ökonomiefaktor (0,9) werden beibehalten.

Tabelle 23: Sensitivitätsanalyse Lebensdauer & Ökonomiefaktor

<i>LD</i>	<i>ecof</i>	<i>VM</i> ₂₀₁₉	<i>ecof</i>	<i>VM</i> ₂₀₁₉	<i>ecof</i>	<i>VM</i> ₂₀₁₉
45	0,60	1,000 %/a	0,45	0,750 %/a	0,75	1,250 %/a
50	0,75	1,012 %/a	0,60	0,810 %/a	0,90	1,215 %/a
55	0,90	1,004 %/a	0,75	0,837 %/a	1,05	1,171 %/a
60	1,05	0,984 %/a	0,90	0,844 %/a	1,20	1,125 %/a

3.3.4 Wärmeversorgungsentwicklung

Die Wärmeversorgungsentwicklung wird für die Trendfortschreibung anhand von Änderungsraten, die aus Quellen abgeleitet werden (siehe Abbildungen 13 & 14), durchgeführt. Dabei wird zwischen Bestand und Neubau unterschieden. Die Änderungsraten für den Bestand sind durch Gleichung 19 gegeben. Weiterhin werden sie im Bestand durch $mod_{i,j}$ (Anteil der Modernisierungen pro Baualterklasse) beeinflusst.

Die Veränderung der Heizungsstruktur kann auch unabhängig von einer Modernisierung, die hier synonym für VM steht, geschehen. Allerdings ist die Modernisierung der Wärmeversorgungsanlage ohne Vollmodernisierung tendenziell nur ein Ersatz oder durch den Wechsel von Heizöl zu Gas geprägt. Weitere Wechsel sind geringfügig und gerade der Wechsel zu einer WP ist in fast allen Fällen zur Effizienzsteigerung durch eine Modernisierung der thermischen Gebäudehülle begleitet (siehe auch Abbildung 63 im Anhang).

$$\begin{aligned}
 FW_{Bestand}(n) &= 0,001 + 0,0001 * n \\
 Gas_{Bestand}(n) &= 0,0005 - 0,0001 * n \\
 Hz_{Bestand}(n) &= -0,003 - 0,0001 * n \\
 Bio_{Bestand} &= 0 \\
 Coal_{Bestand} &= -0,0001 \\
 Str_{Bestand}(n) &= -0,001 - 0,00005 * n \\
 WP_{Bestand}(n) &= 0,002 + 0,00015 * n
 \end{aligned} \tag{19}$$

Durch Gleichung 19 erhöhen sich die Anteile für Fernwärme, Gas, und Wärmepumpen im Modell. Die Zubauraten für Wärmepumpen und Fernwärme vergrößern sich zusätzlich mit fortschreitenden Betrachtungszeitraum. Der Zubau von Gas verringert sich hingegen entsprechend.

Dem Neubau wird für jedes Jahr eine Verteilung (siehe Gleichung 20) zugewiesen. Diese Verteilung wird durch das Flächengewicht mit vorhergehenden Neubauten verrechnet.

$$\begin{aligned}
 FW_{neu} &= [0,17(EFH)/0,32(MFH)] \\
 Gas_{neu}(n) &= 0,37 - 0,01 * n \\
 Bio_{neu} &= 0,04 \\
 WP_{neu}(n) &= [0,42(EFH)/0,27(MFH)] + 0,01 * n
 \end{aligned}
 \tag{20}$$

3.3.5 Ausbau Erneuerbare

Der Ausbau Erneuerbarer wird im Modell durch zwei Teilaspekte abgebildet.

- **Indirekter erneuerbarer Anteil**

Dieser Anteil wird im Modell nur indirekt abgebildet und stellt den steigenden Anteil Erneuerbarer dar, die für Fernwärme oder Strom eingesetzt werden. Dieser Ausbau ist durch sinkende Primärenergie- und Emissionsfaktoren für Fernwärme und Strom im Modell integriert.

- **Direkter erneuerbarer Anteil**

Der direkte Anteil stellt den Anteil dar, der auf Gebäudeebene genutzt wird. Dazu zählen die Biomasse in WVA aber auch Kamin, Solarthermie, Geothermie und Umweltwärme.

Biomasse

Für Biomasse wird angenommen, dass der nachhaltig nutzbare Anteil an Biomasse bereits zu Beginn des Betrachtungszeitraums ausgeschöpft ist bzw. etwaige zusätzliche Potenziale für eine andere (höherwertige) Nutzung (z.B. für die Industrie, Strom oder stoffliche Nutzung) reserviert sind (siehe auch „Biomassennutzung nur in stark begrenzten Mengen“ auf S. 27 in [122]). Der Zubau an Biomasse WVA wächst entsprechend nicht und die Menge, die insgesamt in Kaminen genutzt wird, bleibt konstant.

Solarthermie

Der Ausbau Solarthermie wird anhand des derzeitigen Trends modelliert (siehe [112] & [31]). Die Ausbaugeschwindigkeit der Solarthermie ist in Deutschland und global gegen 2011 gesunken. Ein wieder steigender Zubau ist dabei nicht ersichtlich und derzeit nicht zu erwarten. Im Modell wird für den weiteren Zubau ein konstanter Zuwachs von 0,7625 PJ pro Jahr basierend auf den letzten Jahren angenommen.

Geothermie und Umweltwärme

Der Ausbau Geothermie und Umweltwärme ist abhängig von der Menge der Wärmepumpen. Entsprechend wird Geothermie und Umweltwärme weiterhin zusammen als Menge der genutzten Umweltenergie durch die JAZ der Wärmepumpen modelliert.

3.4 Schlussfolgerungen

In Kapitel 3 wird aufbauend auf den gegebenen Grundlagen in Kapitel 2 das Grundgerüst des Wohngebäudebestandsmodells erstellt. Der energetische Ausgangszustand wird definiert und das Modell auf diesen kalibriert. Durch die Kalibrierung wird eine auf den Endenergieverbrauch kalibrierte Verteilung der Heizungsanlagen auf die Gebäudealtersklassen und -typen erstellt. Somit besteht eine Verteilung, die neben der Anzahl der Anlagen auch deren Größe bzw. Auslastung berücksichtigt. Über die Endenergiebilanz sind so ebenfalls die Bilanzen für Primärenergie und THG kalibriert.

Für die entscheidenden Gebäudebestandsgrößen werden endogene Berechnungsformeln entwickelt. Die Formel für die Wohnflächenentwicklung (Gleichung 10) liefert ähnliche Ergebnisse, wie sie in [13] angenommen werden. Daneben zeigte eine Anwendung der Gleichung auf den vergangenen Zeitraum 2001-2018 sinnvolle Ergebnisse. Zwar schlägt die Gleichung sensitiver auf Bevölkerungsveränderungen an, als es in der Realität zu beobachten war, die durchschnittliche Wohnflächenentwicklung (0,74 %/a) deckt sich aber sehr gut mit dem realen Verlauf (0,72 %/a).

Für die Modellierung der Modernisierungsaktivitäten wird Gleichung 15 genutzt, die im wesentlichen durch die Lebensdauer und den Ökonomiefaktor beeinflusst wird. Bei der Sensitivitätsanalyse dieser zwei Parameter zeigen sich fast identische Verläufe, wenn diese aufeinander-

der so abgestimmt werden, dass die Vollmodernisierungsrate im Erwartungsbereich liegt. Die Nutzung des Ökonomiefaktors in Kapitel 3 gleicht einer Blackbox, da es einen Eingangs- und Ausgangserwartungsbereich gibt. Der Eingangserwartungsbereich ergibt sich aus der Nutzung der Lebensdauer für Bauteile oder, wie im Modell, für VM. Der Ausgangserwartungsbereich ist durch den erwarteten Zielwert (VM-Rate) bestimmt. Daneben wird ein reduzierender Einfluss erwartet, der zu geringeren Modernisierungsraten führt (angenommener Sanierungsstau). Unter dieser Prämisse sind Kombinationen für Lebensdauern im Bereich von 50-60 Jahren realistisch. Es wird sich für die Weiterverwendung von LD=55 Jahren entschieden, da bei einer Lebensdauer von 50 Jahren der Ökonomiefaktor sehr gering wäre. Dabei muss berücksichtigt werden, dass durch die Nutzung realer Modernisierungsgeschwindigkeiten (Altbau bis 1978) für die erwartete Modernisierungsrate (siehe \widehat{mod}_i in Gleichung 15) bereits ein Effekt des Ökonomiefaktors eingerechnet wird. Bei einer Lebensdauer von 50 Jahren wäre der gesamte Effekt des Ökonomiefaktors bei einer dann zu erwartenden Modernisierungsrate von 2%/a (siehe $\widehat{mod}_i = 1/LD$ in Gleichung 16) 0,54. Bei 55 Jahren liegt der Ökonomiefaktor stattdessen bei 0,71.

Die weitere Entwicklung der Wärmeversorgung wird durch eine Weiterführung vergangener Entwicklungen verschnitten mit den Modernisierungsraten berücksichtigt.

4 Anwendung des Wohngebäudebestandsmodells

In Kapitel 4 wird das entwickelte Modell verwendet um als erstes den derzeitigen Trend zu untersuchen und zu bewerten. Etwaige Abweichungen von den nationalen Klimaschutzzielen für 2050 werden daraufhin in weiteren Szenarien durch exogene Einflussnahme auf einzelne Parameter hinsichtlich ihres Einflusses auf die Zielerreichung analysiert und bewertet.

4.1 Derzeitiger Trend

Die in Kapitel 3 definierten Modellierungsparameter für die Entwicklungen des Wohngebäudebestands, der Modernisierungsaktivitäten und der Wärmeversorgungsanlagen orientieren sich bereits am derzeitigen Trend. Mit den gewählten Parametern ergibt sich in 2050 ein Anteil von 63,9 % VM bei den EFH/RH und 72,3 % bei den MFH für die Baualtersklassen bis einschließlich dem Baujahr 2001. Die Baualtersklassen bis einschließlich Baujahr 1979 sind zu mindestens 71 % (EFH) und 77 % (MFH) vollmodernisiert. Bei jüngeren Baualtersklassen stellt sich die Frage inwiefern, eine Modernisierung aus energetischer Sicht überhaupt zur Zielerreichung 2050 ins Auge gefasst werden sollte, da diese bereits Effizienzstandards beim Bau genügen mussten. Die Verteilung der Wohnflächen in 2050 ist in Abbildung 30 dargestellt.

In Abbildung 30 zeigt sich, dass in 2050 der Anteil der Neubauten (MFH) im Ursprungszustand nach Wohnfläche am größten ist (siehe BAK 2019-2050 in Abbildung 30). Dies ist einerseits dadurch bedingt, dass Altbauten in der Abbildung in den Ursprungszustand und die zwei Modernisierungsvarianten aufgeteilt sind. Andererseits ist die Baualtersklasse mit einer Einteilung von 2019-2030 sehr groß gewählt. Dass die Flächen verglichen mit denen der EFH in der selben Baualtersklasse größer sind, ist auf den höheren Zuwachs von Wohnfläche in 2020-2030 (vgl. Abbildung 23) und den daraus abgeleiteten größeren Anteil von MFH zu EFH (siehe Abbildung 24) in diesen Jahren zurückzuführen.

Der Anteil Wohnfläche von Gebäuden die nach 2018 errichtet wurden entspricht 19,4 % der Gesamtwohnfläche in 2050. Dahingegen ist der Anteil des Neubaus am Wärmeverbrauch bezogen auf die Bilanzgrenze Wärmeerzeuger nur 10,8 %. Dies ist auf die sehr hohen Energiestandards (38,6-41,4 kWh/m²a) zurückzuführen, die für neue Gebäude angenommen werden und größ-

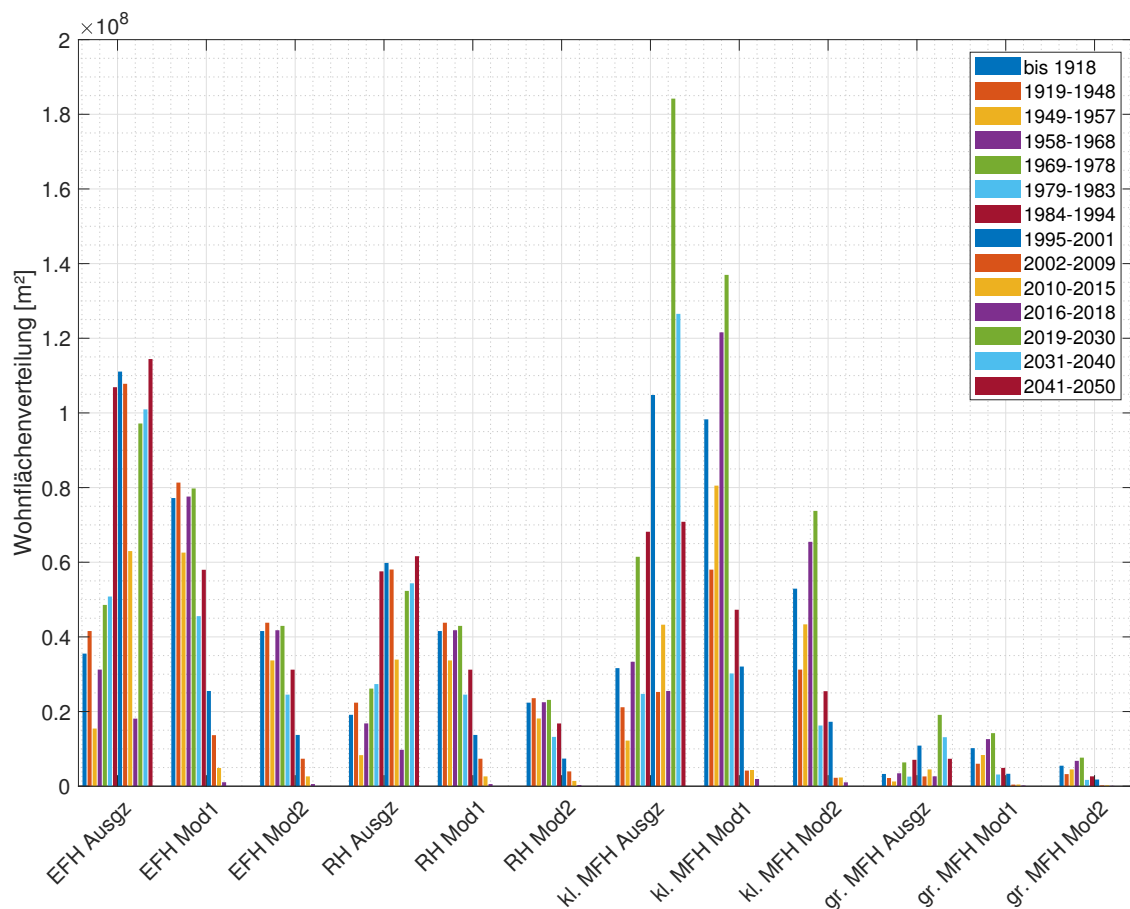


Abbildung 30: Wohnflächenverteilung pro Baualtersklasse und Gebäudetyp im Trendszenario 2050

tenteils geringere Verbräuche aufweisen als die hochwertige Modernisierungsvariante für die verschiedenen übrigen Baualtersklassen ($39,4\text{-}75,6 \text{ kWh/m}^2\text{a}$). Daneben weist der Neubau sehr hohe Anteile von Wärmepumpen (von $30/48 \%$ steigend auf ca. 70%) und signifikante Anteile von Fernwärme auf (vgl. Abbildung 31). Neben der hohen Effizienz der Wärmepumpen werden der Einfluss auf die CO_2 -Äquivalente durch sinkende Emissionsfaktoren unterstützt. Entsprechend ist der Anteil des Neubaus nur $4,1 \%$ an den CO_2 -Äquivalenten in 2050. Der Einfluss des Neubaus ist damit wesentlich geringer als er in der Vergangenheit zwischen 1990-2018 war. Entscheidend hierfür sind zwei Punkte. Erstens beträgt der Verbrauch der nach 2018 zugebauten Gebäude nur $25\text{-}40 \%$ dessen, was die zugebauten Neubauten zwischen 1990-2018 verbrauchen. Zweitens nutzen die ab 2018 zugebauten Gebäude zum Großteil Heizungstechnologien mit geringen THG-Emissionen. Zwischen 1990 und 2018 hingegen waren Gas und Heizöl wichtigste Energieträger.

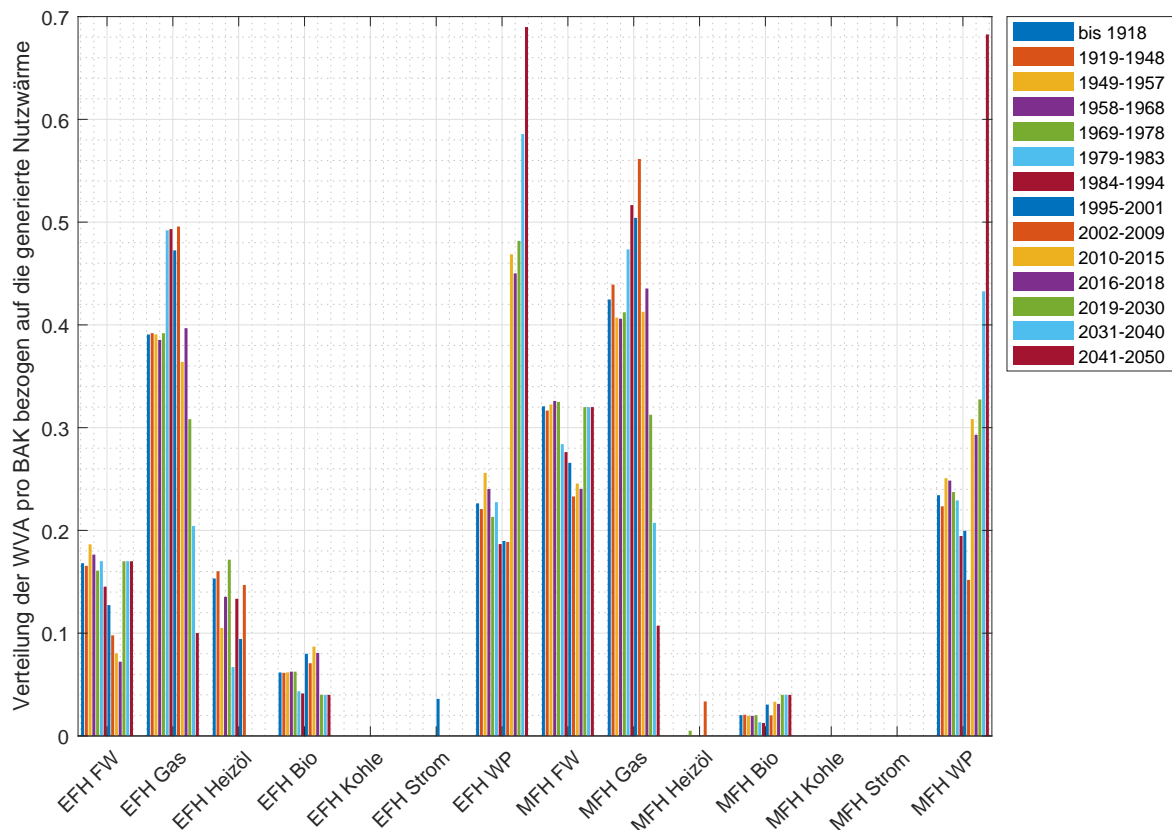


Abbildung 31: Verteilung Wärmeversorgungsanlagen pro Baualtersklasse im Trendszenario 2050

In Abbildung 31 zeigt sich, dass die Restanteile Kohle in 2050 gänzlich entfallen. Auch die Nutzung von Direktstrom ist bis auf ein Überbleibsel in EFHs in der Baualtersklasse 1995-2001 verschwunden. Die Ursache hierfür sind einerseits ein vergleichsweise höherer Anteil Direktstrom in dieser Baualtersklasse nach der Feinkalibrierung (siehe Abbildung 21) und andererseits die geringen Modernisierungsraten in der relativ jungen Baualtersklasse 1995-2001. Heizöl hat nur bei EFH Altbauten einen nennenswerten Anteil von etwas mehr als 10 %. Fernwärme konnte vor allem bei Altbauten und im Neubau Anteile hinzugewinnen. Gas ist grundsätzlich um ca. 10 % gesunken und die Neubauten zeigen einen sinkenden Anteil mit einem Minimum von immerhin noch 10 % in der neusten Baualtersklasse 2041-2050. Die sinkenden Anteile Gas im Neubau werden durch steigende Anteile von Wärmepumpen ausgeglichen. Daneben setzen sich Wärmepumpen in Altbauten weiter durch und halten in EFHs höhere Anteile als die Fernwärme. Bei den Altbauten der MFHs ist der Anteil Fernwärme höher als der der Wärmepumpen.

Ein Vergleich der Bilanzen für das Trendszenario 2050 mit den Ausgangsbilanzen ist in Tabelle 24 gegeben. Der Endenergieverbrauch sinkt im Vergleich zu 2018 um ca. 20 %, spezifisch sogar um 33,2 %. Entsprechend sind die Gebäude im Durchschnitt 33 % effizienter. Der Primärenergieverbrauch sinkt dagegen stärker, da hier der Wechsel hin zu effizienteren Wärmeversorgungsanlagen zusätzlich durch sinkende Primärenergiefaktoren für Strom und Fernwärme verstärkt wird. Gleiches gilt auch für die CO_2 -Äquivalente mit sinkenden Emissionsfaktoren. Ein nahezu klimaneutraler Gebäudebestand, mit einer Reduzierung der Emissionen um 95 % gegenüber dem Jahr 1990, wird allerdings nicht erreicht. Der erreichte Endenergieverbrauch im Trendszenario in 2050 ist mit 422,3 TWh/a unter den oberen Werten anderer Szenarienbetrachtungen³¹, diese sind allerdings auch nur 2-11 % unter dem Ausgangswert für 2018 und beziehen sich zumindest in zwei Fällen auf das Ausgangsjahr 2010 mit einem deutlich höheren Endenergieverbrauch von 610 TWh. Werden die Einsparungen genauer betrachtet, entsteht ein zusätzlicher Endenergiebedarf für die Neubauten von ca. 10 % und eine Reduktion von 5 % (allerdings nur 1 % vgl. mit dem Ausgangsjahr 2018, da 2018 überdurchschnittlich warm war) durch die weiterhin erwartete Klimaerwärmung. Somit verbleiben eine Endenergieeinsparung von ca. 29 % im Vergleich zum Ausgangsjahr 2018, die durch die fortlaufende Modernisierung des Bestands innerhalb von 32 Jahren gelingt.

Tabelle 24: Vergleich Bilanzen 2018 mit Trendszenario 2050

	2018 Modell	2050 Trend	Δ 2018 [%]	Δ 1990 [%]
Endenergie [TWh/a]	525,9	422,3	-19,7 %	-
Endenergie spez. [kWh/m ² a]	135,6	90,6	-33,2 %	-
Primärenergie [TWh/a]	502,3	253,2	-49,6 %	-
Primärenergie spez. [kWh/m ² a]	129,5	54,3	-58,1 %	-
CO_2 -Äquiv. [Mio. t/a]	122,3	54,2	-55,7 %	-70,5 -73,0 %
CO_2 -Äquiv. spez. [kg/m ² a]	31,5	11,6	-63,2 %	-

Eine Endenergieeinsparung von 29 % im Trendszenario durch fortschreitende Modernisierung kann derzeit bei Betrachtung der Entwicklung in den vergangenen Jahren kritisch hinterfragt werden. Entscheidend hierfür ist, ob die durchschnittliche VM-Rate auf 1 %/a gehalten werden kann sobald eine Sättigung bei Bauteilen mit höherer Modernisierungsrate (Fenster & Dach) erreicht wird. Fraglich ist, ob in diesem Fall der Fokus auf die noch ausstehenden Bauteile gelegt wird oder diese unverändert weiterhin nur spärlich modernisiert werden. Letzteres wür-

³¹Obere Szenarienwerte: 470-515 TWh/a, untere Szenarienwerte: 221-366 TWh/a in [101], [74], [61].

de entsprechend in geringeren Modernisierungsraten und einem höheren Endenergieverbrauch resultieren.

Die Gesamtbilanzen für Endenergie, Primärenergie und Treibhausgase in CO_2 -Äquivalenten sind in Abbildung 32 inklusive ihrer Aufteilung in die verschiedenen Energieträger gegeben. In Abbildung 32 wird auch ersichtlich, warum ein nahezu klimaneutraler Gebäudebestand nicht erreicht wird. Die signifikanten Anteile Gas erzeugen 65,1 % der CO_2 -Äquivalente des Trendszenarios in 2050. Daneben sind die größten Erzeuger von Emissionen Heizöl (14,6 %) und Fernwärme (12,2 %). Während Fernwärme damit allerdings 21,2 % des Wärmeverbrauchs deckt, ist der Anteil der von Gas gedeckt wird nur 42,0 % und von Heizöl 7,2 %. Entsprechend sind die verbleibenden Anteile Heizöl und Gas die größten Hebel zur weiteren Reduktion der CO_2 -Äquivalente.

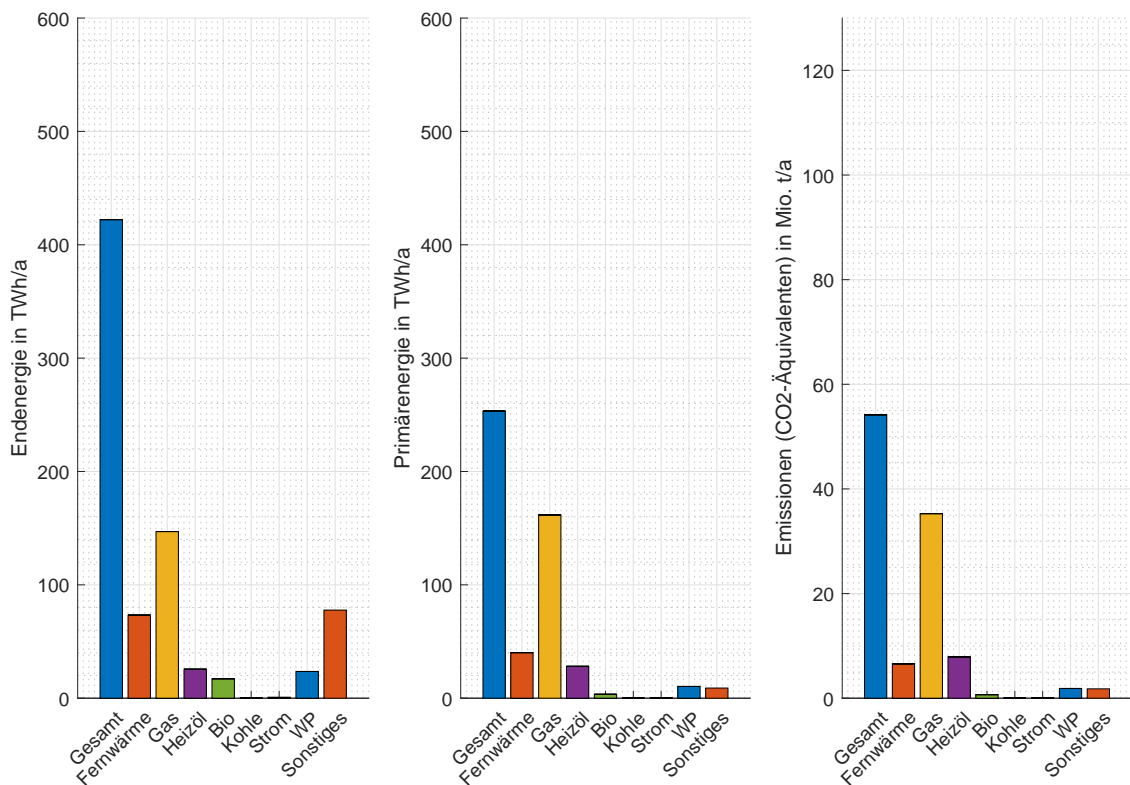


Abbildung 32: Gesamtbilanz für Endenergie, Primärenergie und THG im Trendszenario 2050

Die Wärmepumpen zeigen wiederum ein anderes Bild. Mit einem Anteil von 3,4 % der CO_2 -Äquivalente decken sie 25,1 % des Wärmeverbrauchs. Die Strommenge die 2050 für Warmwasser und Raumwärme benötigt wird, ist fast gänzlich auf Wärmepumpen zurückzuführen. Der

Stromverbrauch der Wärmepumpen im Modell beträgt 23,6 TWh und ist dadurch insgesamt um 3,1 % größer als in 2018, wo ein Großteils des Stroms direkt genutzt wird. Der erwartete starke Anstieg des Strombedarfs in Folge der Nutzung von Wärmepumpen ist also im Trendszenario nicht eingetreten. Hier lässt sich aber bereits erkennen, dass der Stromverbrauch im Gebäudebereich, wenn zur Wärmeerzeugung Gas und Heizöl durch Wärmepumpen substituiert werden, etwa dem Dreifachen des Verbrauchs für Raumwärme und Warmwasser in 2018 entsprechen würde.

4.2 Anhebung der Modernisierungsrate

In einem ersten Schritt wird angenommen, dass es gelingt den Ökonomiefaktor ($ecof_{i,j}(n)$) auf 1 zu erhöhen. Hierdurch erhöhen sich die THG-Einsparungen in 2050 um ca. 4 %.

Für die weitere Erhöhung der Modernisierungsrate wird \widehat{mod}_i (siehe Gleichungen 15 & 16) angepasst. Durch die Anpassung wird der Wert für \widehat{mod}_i innerhalb von 13 Jahren linear auf den doppelten Wert des Referenzfalls für EFH (siehe Gleichung 16, 0,01268) erhöht. Diese lineare Steigerung wird bis zum Ende des Betrachtungszeitraum fortgeführt. Die ursprünglichen Normalverteilungen mit Höchstwert nach 59,5 - 64 Jahren werden so wesentlich verkürzt und erreichen bereits bei 43,5 Jahren den Höchstwert. 61 Jahre nach der Baufertigstellung des letzten Gebäudes einer Baualtersklasse sind so 95 % der Baualtersklasse voll modernisiert. Die restlichen 5 % werden im Modell als Denkmalschutz geführt. Sie stehen damit nicht für eine Vollmodernisierung zur Verfügung. Die resultierenden VM-Raten sind in Abbildung 33 gegeben.

Es zeigt sich, dass einige Baualtersklassen das Maximum von 95 % erreichen und die Modernisierungsrate sprunghaft gegen null sinkt. Die Baualtersklassen bis einschließlich 1978 erreichen ein Vollmodernisierungsgrad von 95 %. Die Baualtersklassen bis 1983, 1994 und 2001 erreichen 89 %, 78 % und 61 %. Damit sind alle Gebäude mit sehr hohem Einsparpotenzial voll modernisiert und Gebäude mit teilweise hohem Einsparpotenzial (BAK 1983-2001) zum Großteil modernisiert. Der sich ergebende Vollmodernisierungsgrad auf alle Gebäude bezogen ist 83,6 % und wird als obere Grenze des sinnvoll anzustrebenden Modernisierungsgrads für 2050 angesehen. Diese obere Grenze wird dabei erreicht ohne, dass die VM-Rate im Betrachtungszeitraum je 2 %/a erreicht. Stattdessen ist sie sogar zum Großteil wesentlich kleiner und erreicht in 2035

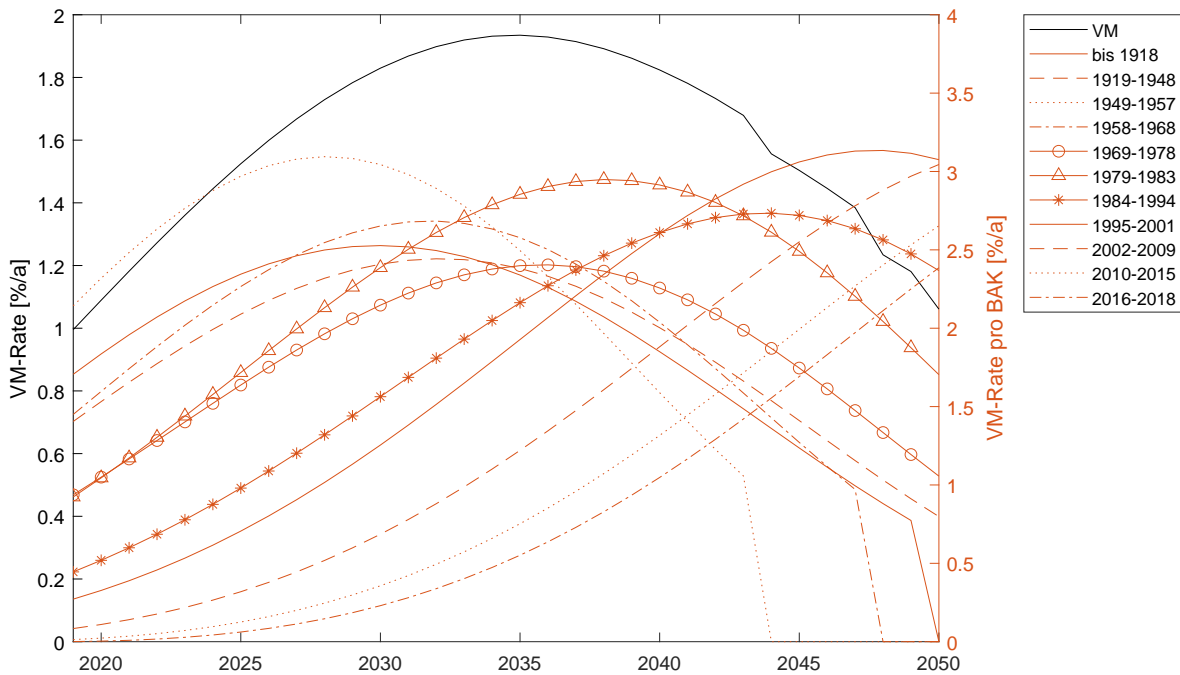


Abbildung 33: VM-Raten gesamt und pro BAK im Modell bei exogener Erhöhung; die VM-Raten beziehen sich jeweils auf die Gesamtmenge der BAK bzw. den gesamten Wohngebäudebestand inklusive Neubau

ihren Höhepunkt mit 1,93 %/a. Danach sinkt sie wieder kontinuierlich auf 1,06 % in 2050. Zu bedenken bleibt, dass die Prozentangabe sich auf die steigende Gesamtmenge der Wohnfläche bezieht.

In Abbildung 34 zeigt sich der hohe Modernisierungsgrad in 2050 durch die Verschiebung der Flächen aller Altbauklassen in die entsprechende Modernisierung 1 und 2. Vereinfacht gesagt bedeutet dies, dass es in diesem Szenario gelungen ist bei allen Gebäuden die ein hohes energetisches Einsparpotenzial aufweisen eine Vollmodernisierung durchzuführen. Die Vollmodernisierung wird dabei zeitlich je nach Sanierungsbedarf durchgeführt und (aufgrund des Ökonomiefaktors) tendenziell vorgezogen. Während derzeit Sanierungen eher hinausgezögert werden, wird sich in diesem Szenario dafür entschieden sie vorzuziehen, um die Vorteile der Vollmodernisierung zu erschließen.

Während Vollmodernisierungen direkt an die Maßnahmen der thermischen Gebäudehülle gekoppelt sind, sind die Auswirkungen auf die Wärmeversorgungsanlagen nur indirekt im Modell ab-

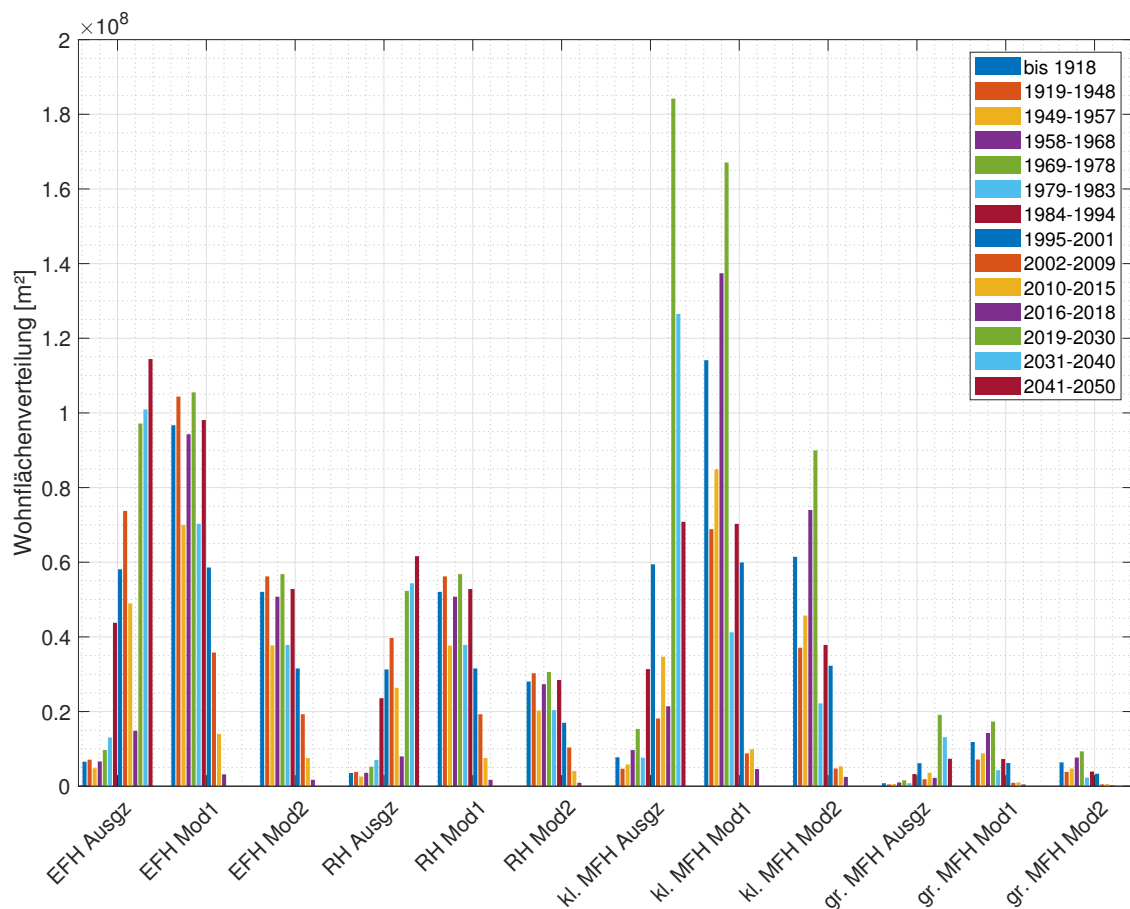


Abbildung 34: Wohnflächenverteilung pro Baualtersklasse und Gebäudetyp im Szenario erhöhte Modernisierung 2050

gebildet. Die Austauschraten im Trendszenario orientieren, aufgrund fehlender Entscheidungskriterien (z.B. wirtschaftliche), an den Entwicklungen im Marktgeschehen der Heizungsanlagen zu Beginn des Betrachtungszeitraums in Kombination mit den VM-Raten. Entsprechend ist ein erhöhter Wechsel zu den Heizungstechnologien Fernwärme und Wärmepumpen in der Verteilung der Wärmeversorgungsanlagen für 2050 in Abbildung 35 ersichtlich. Es verbleibt aber ein hoher Anteil Gasanlagen, da diese in den 2020er noch den Hauptteil aller Absätze von Wärmeversorgungsanlagen ausmachen und eine deutliche Abkehr noch nicht ersichtlich ist.

Die Gesamtbilanzen für Endenergie, Primärenergie und THG sind in Abbildung 36 dargestellt. Die Endenergieeinsparungen konnten auf 29,1 % (vgl. Trendszenario 19,7 %) erhöht werden. Diese Einsparung wird als obere Grenze der Endenergieeinsparung ohne einschneidende Maßnahmen, wie Vollmodernisierung energetisch höherwertiger Gebäude (z.B. BAK bis 2015), radikale

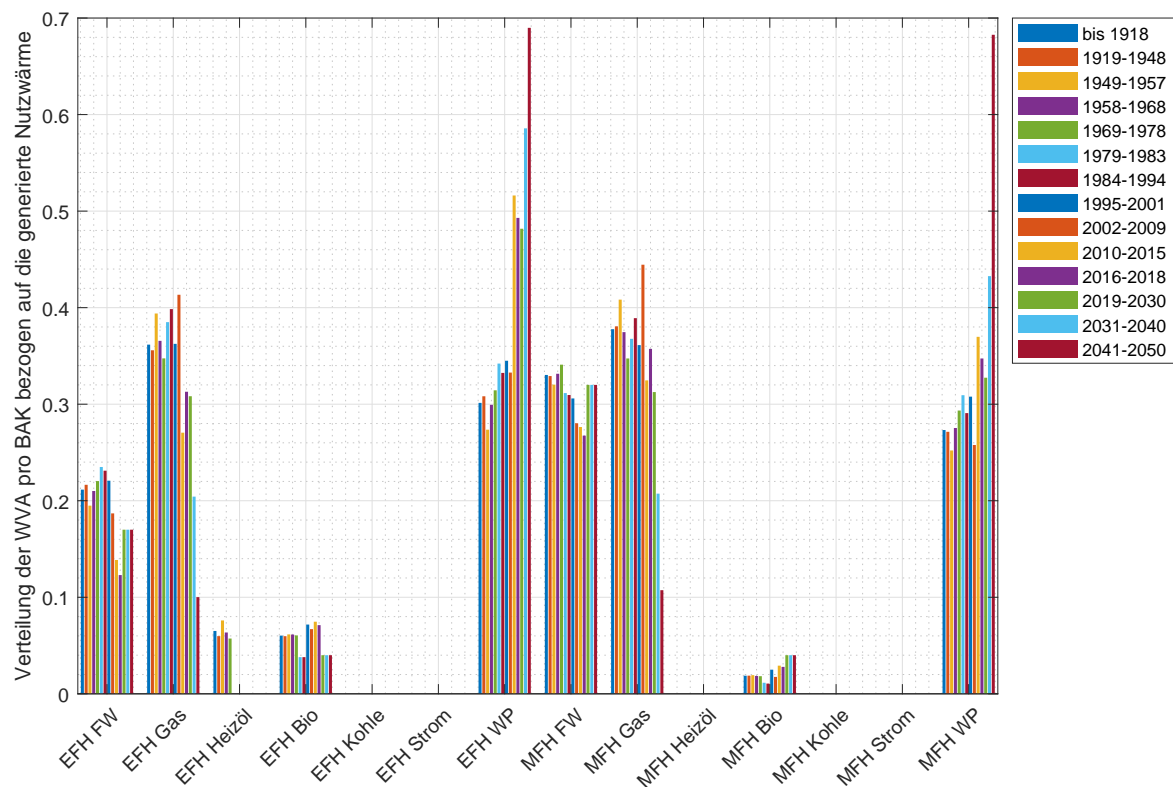


Abbildung 35: Verteilung Wärmeversorgungsanlagen pro Baualtersklasse im Szenario erhöhte Modernisierung 2050

Verhaltensänderungen, wesentlich höhere Energiestandards oder Einflussnahme auf Rückbau und Neubau gesehen. Das Ergebnis für den Endenergieverbrauch ist damit vergleichbar mit der unteren Grenze des Endenergieverbrauchs in anderen Untersuchungen (vgl. Modell: 372,5 TWh mit 340 TWh in [61] & 366 TWh in [101]).

Die Primärenergieeinsparungen steigen auf 62,4 % (vgl. Trendszenario 49,6 %) und weichen damit von der ungefähren Zielmarke der Bundesregierung von -80 % Primärenergie verglichen zu 2008 ab. Die verbleibenden Primärenergieverbräuche in 2050 sind zu 63 % auf die immer noch signifikanten Gasanteile im Bestand zurückzuführen (vgl. Abbildungen 35 & 36).

Die THG-Bilanz verhält sich analog zur Primärenergiebilanz. Die Einsparungen an CO_2 -Äquivalenten steigen von 55,5 % im Trendszenario auf 68,3 %. Werden die Einsparungen auf das Jahr 1990 bezogen, ergeben sich Einsparungen von 79-80,7 %. Auch hier verhindern die Gasanteile mit 66,4 % der THG-Emissionen größere Einsparungen in 2050.

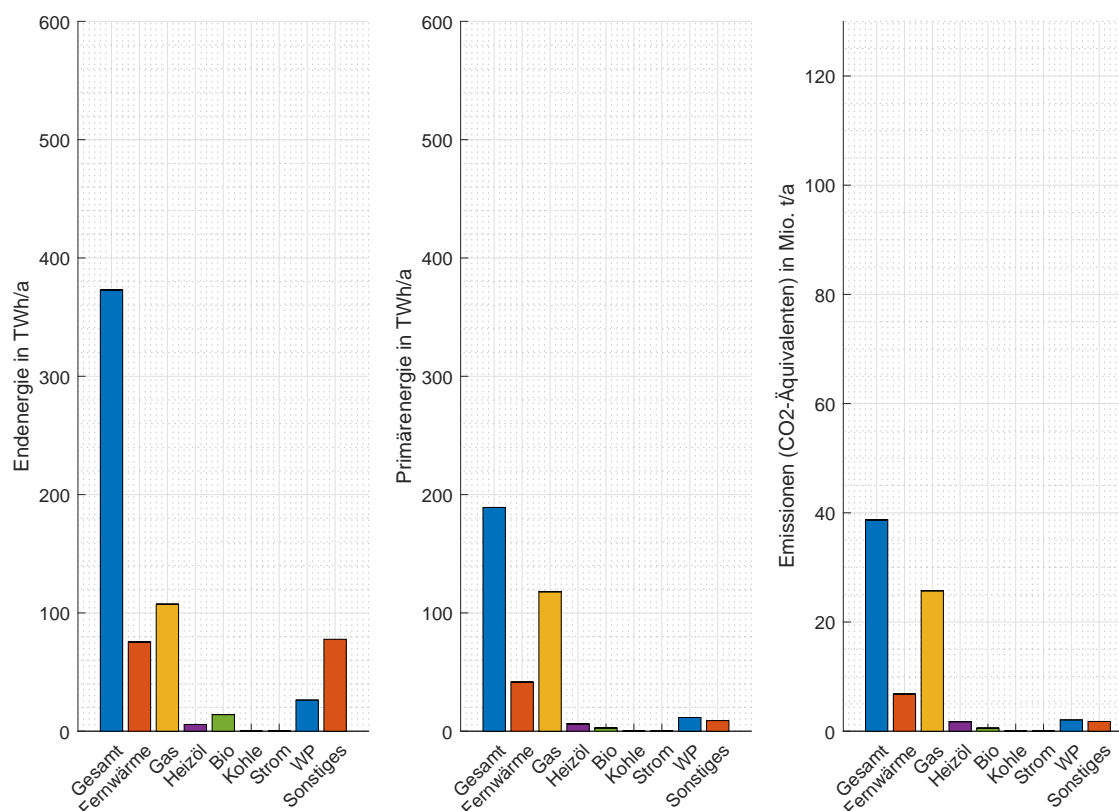


Abbildung 36: Gesamtbilanz für Endenergie, Primärenergie und THG im Szenario erhöhte Modernisierung 2050

Es kann festgehalten werden, dass die Modernisierung bzw. die Modernisierungsrate allein als Zielwert nicht ausreichend ist, um die gesetzten Ziele der Klimaneutralität bis 2045 oder auch 2050 zu erreichen. Die Modernisierung senkt den Endenergieverbrauch und erleichtert damit die Versorgung mit endlichen Potenzialen für Erneuerbare in Deutschland. Aber ohne die gleichzeitige und gezielte Umstellung der Wärmeversorgung auf Fernwärme oder Wärmepumpen sind die Endenergieeinsparungen nicht zielführend. Die Modernisierung ist damit „nur“ die Grundlage für einen zielführenden Umbau der Wärmeversorgung aber nicht das Ziel selbst.

4.3 Reduzierter Flächenverbrauch

Im nächsten Schritt wird untersucht inwiefern sich eine Einflussnahme auf den Flächenverbrauch durch Veränderung bei Neubau und Rückbau auf die Zielerreichung auswirkt. Hierzu

wird die Gleichung für die Wohnflächenentwicklung (siehe Gleichung 10) angepasst. Der Parameter für das Basiswachstum (bg_n) wird auf 0,35 %/a (vorher 0,7 %/a) reduziert und der Faktor für den Einfluss der Bevölkerungsentwicklung (pgf_n) auf 1 (vorher 0,75) erhöht. Damit wirkt sich die Bevölkerungsentwicklung 1:1 auf die Wohnflächenentwicklung aus. Es ergibt sich ein Verlauf für die Wohnfläche wie in Abbildung 37.

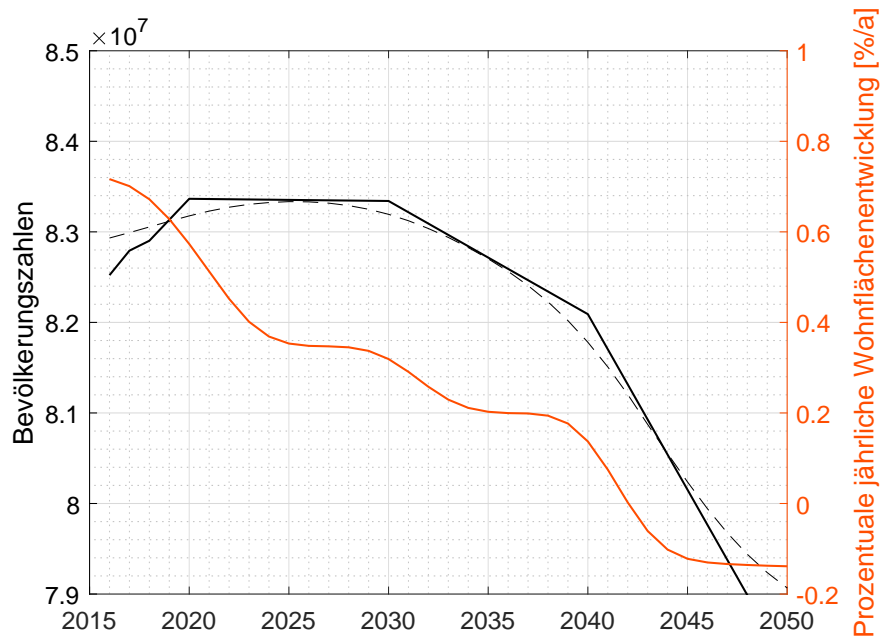


Abbildung 37: Vergleich der Bevölkerungs- und Wohnflächenentwicklung im Szenario reduzierter Flächenverbrauch

Dieser Verlauf zeigt bereits zu Beginn der Modellierung eine Reduzierung des Wohnflächenwachstums. Dies steht im Kontrast zu dem derzeit angespannten Wohnungsmarkt (2018-2021) und den daraus resultierenden Forderungen nach höheren Neubauvolumina. Der Zuwachs der Wohnfläche sinkt schneller und erreicht in 2043 erstmals einen negativen Wert. Die Wohnfläche wächst so um 6,4 % zwischen 2018 und 2050 (vgl. Flächenwachstum in Trendszenario 20,2 %).

Es kann nicht beantwortet werden, inwiefern eine Art max. Kapazität an Neubau zu anderen Verhältnissen bei EFH und MFH führt. Es ist denkbar, dass vermehrt MFHs gebaut werden, wenn die Baufläche begrenzt wird. Hintergrund sind die höheren Wohnungszahlen, die in MFHs im Vergleich zu EFHs pro m^2 Baufläche erreicht werden. Ob dies der Fall wäre, wird nicht weiter untersucht und stattdessen wie im Folgenden beschrieben vorgegangen. Die Modellierung

des Neu- und Rückbaus ist basierend auf den vergangenen Entwicklungen erstellt worden. Die Nutzung der Korrelation zwischen Rückbau/Neubau und dem EFH Anteil am Neubau ist ab dem Unterschreiten eines Wohnflächenzuwachses unter 0,2% inhaltlich und mathematisch nicht mehr sinnvoll³². Zum besseren Verständnis sind die Funktionsverläufe der Vorfaktoren des Neu- (Gleichung 11) und Rückbaus (Gleichung 12) im Anhang in Abbildung 64 dargestellt. Inhaltlich macht die Nutzung der Funktionen in diesem „Extremwertbereich“ keinen Sinn mehr, da der EFH Anteil linear auf 100% und darüber hinaus läuft. Der EFH Anteil am Neubau wird auf ein Maximum von 84,4% (=0,2%/a WFL) begrenzt. Das Verhältnis Neubau zu Rückbau muss entsprechend in diesem Bereich anders definiert werden. Dem Neubau wird ebenfalls ein Minimalwert zugewiesen (siehe Abbildung 38). Der Rückbau kann dann aus der Differenz der Wohnflächenentwicklung und dem Neubau berechnet werden.

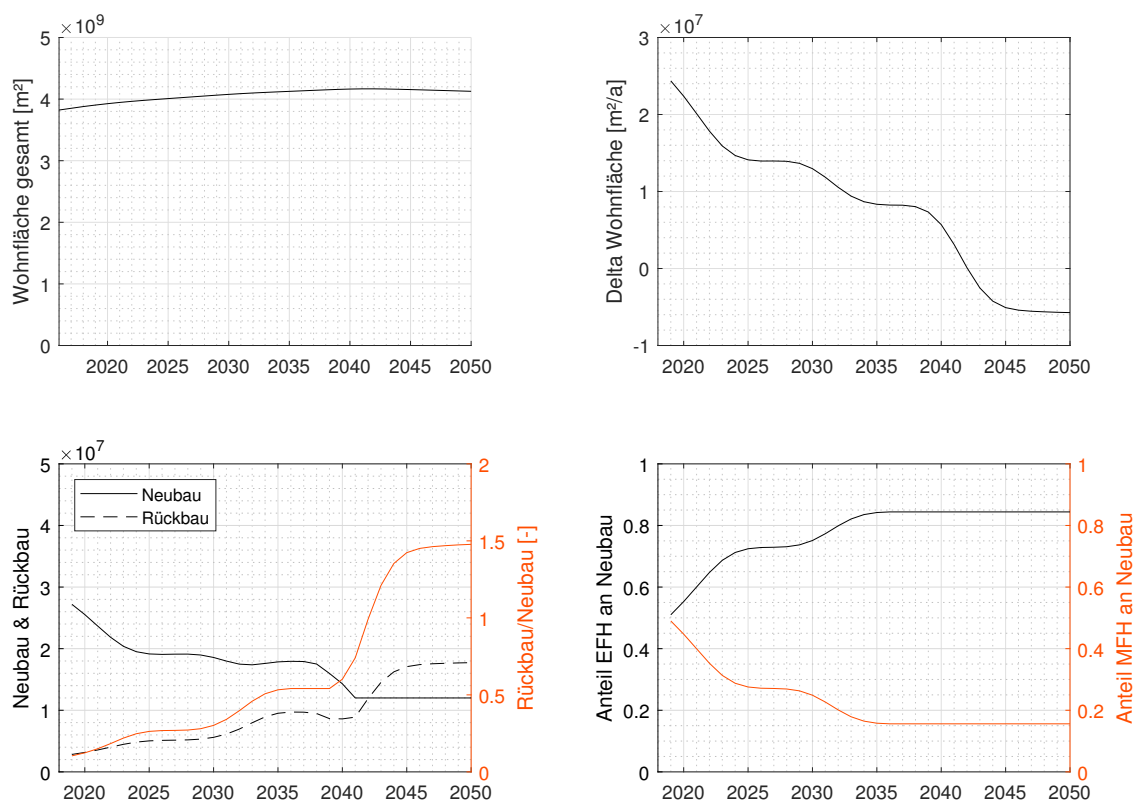


Abbildung 38: Übersicht der Wohnflächenparameter im Szenario reduzierter Flächenverbrauch

³²Mathematisch: Der Sprung der Funktion bei 0,9 macht eine Nutzung in diesem Wertebereich wenig sinnvoll.

In Abbildung 38 ist eine Übersicht über die wichtigsten Modellierungsparameter für den Wohngebäudebestand gegeben. Der Neubau ist in diesem Szenario stärker an den Rückbau geknüpft, so dass der Neubau stark wachsende Anteile von Ersatzbauten aufweist. Der Ersatzbau muss dabei nicht am selben Standort stattfinden. Gebäude werden an Orten mit geringem Wohnungsbedarf rückgebaut und an Orten mit hohem Bedarf entsprechend neugebaut. Dies könnte bspw. durch einen Flächenzertifikatshandel³³ erreicht werden. Durch eine Reduzierung des Wachstums der Wohnfläche bei gleichzeitigem Beibehalten eines gering bis moderaten Neubaus wird ein hoher Rückbau erzwungen. Da bei dem Rückbau ausschließlich energetisch niederwertige Gebäude rückgebaut werden, sinkt der spezifische Endenergiebedarf durch hochwertige neue Gebäude und den Rückbau niederwertiger Altbauten. Durch die ähnlich hohen Aufkommen von Neu- und Rückbau ergibt sich auch die Möglichkeit den Ressourcenbedarf zu signifikanten Teilen aus dem Rückbau zu decken, sofern bautechnische Anforderungen dies erlauben. Dies ist derzeit und war in der Vergangenheit allein schon aufgrund der zehnfach höheren Massen beim Neubau verglichen mit dem Rückbau nicht möglich. Hinsichtlich des Flächen- und Ressourcenverbrauchs wäre dieses Szenario entsprechend ein entscheidender Schritt in Richtung Nachhaltigkeit im Wohnungsbau.

Die Simulation der Modernisierung ist wie im Trendszenario eingestellt und weist keine nennenswerten Abweichungen auf. In Abbildung 39 sind die Gesamtbilanzen dargestellt. Es wird ersichtlich, dass eine reduziertes Wohnflächenwachstum auch Einfluss auf die THG-Emissionen (-4,5 Mio. t vgl. Mod-Szenario: -15,5 Mio. t; jeweils gemessen am Trendszenario) hat. Von den 4,5 Mio. t Einsparungen sind nur 21% auf das geringere Neubauvolumen und der Rest auf den erhöhten Rückbau der Altbauten zurückzuführen. Der Rückbau steigt von 118,5 Mio. m² im Trendszenario auf 296,5 Mio. m². Die Emissionen einer verringerten Wohnflächennutzung sind entsprechend entscheidend vom Verhältnis des Neubaus zum Rückbau abhängig. Hierbei muss bedacht werden, dass Emissionen während des Baus und Rückbaus nicht in das Modell einbezogen sind.

³³Siehe Modellversuch Flächenzertifikatehandel [75].

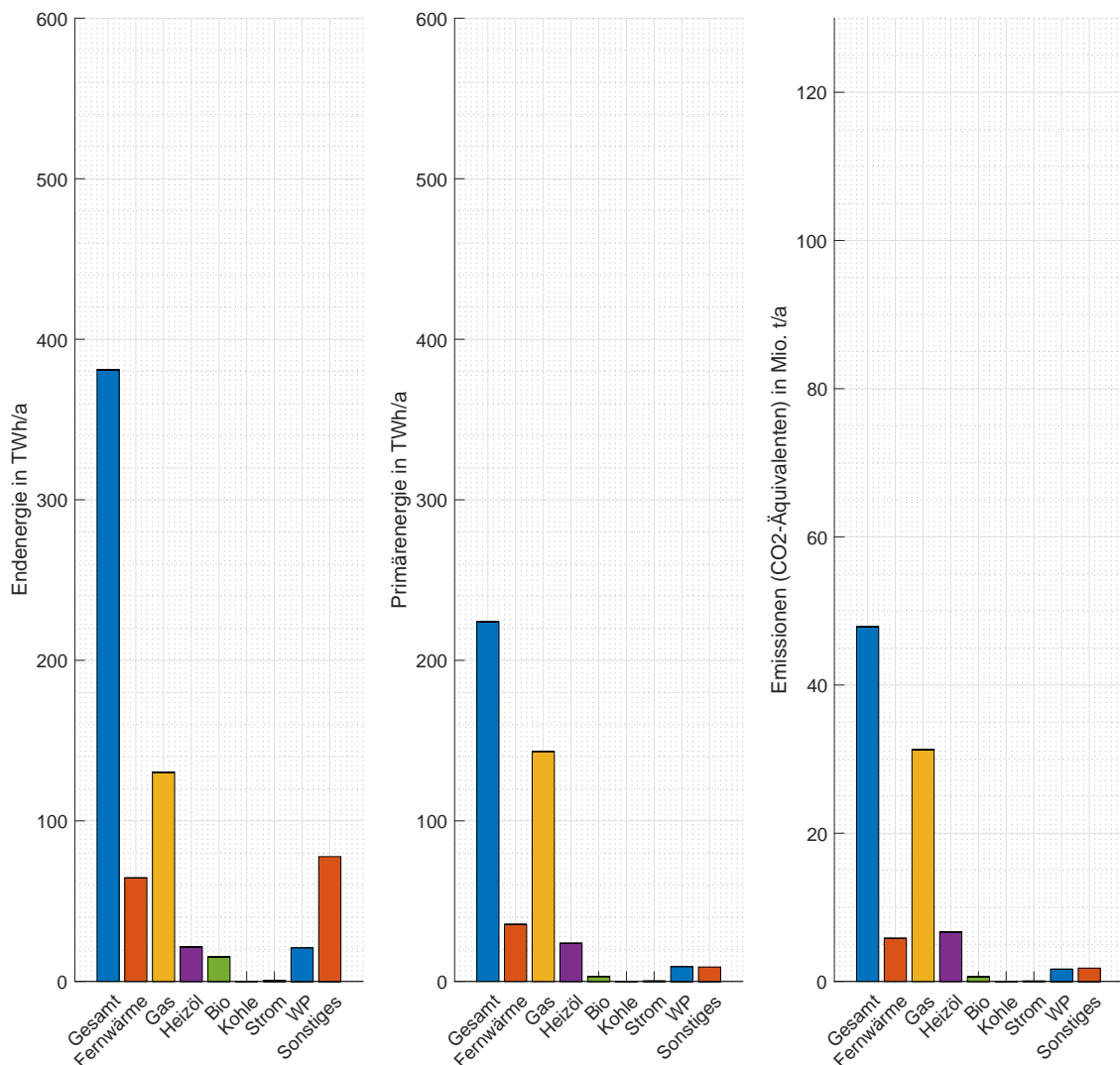


Abbildung 39: Gesamtbilanz für Endenergie, Primärenergie und THG im Szenario reduzierter Flächenverbrauch 2050

4.4 Zielführende Substitution der Wärmeversorgung

Es hat sich bereits im Abschnitt 4.2 gezeigt, dass eine Substitution der Wärmeversorgungsanlagen entscheidend ist. In diesem Szenario wird auf Basis der erhöhten Modernisierungsraten aus Abschnitt 4.2 der Austausch der Wärmeversorgungsanlagen wesentlich beschleunigt, um so die Ziele für den Wohngebäudebestand zu erreichen. Es werden sukzessive die Veränderungsraten der Wärmeversorgungsanlagen erhöht, bis die Ziele für den Wohngebäudebestand erreicht werden. Die abschließende Verteilung der Wärmeversorgungsanlagen zeigt Abbildung 40.

Exkurs Substitution Gas mit Wasserstoff oder synthetischen Brennstoffen:

Theoretisch ist es auch denkbar die deutlichen Restemissionen durch Wärmeversorgungsanlagen auf Basis von Gas durch den Ersatz des Brennstoffes anstelle des Ersatzes der WVA zu erreichen. Positiv hierfür wäre die ggf. denkbare weitere Nutzung bestehender WVA und der bestehenden Gasinfrastruktur. Allerdings sind Erzeugungskapazitäten in Deutschland aufgrund mangelnder Potenziale für Erneuerbare stark begrenzt. Im Rückschluss müssten diese Brennstoffe zum überwiegenden Teil importiert werden. Daneben sind andere Sektoren wie Industrie und Verkehr im stärkeren Maße auf diese Brennstoffe angewiesen, während im Gebäudebereich auch andere Lösungen möglich sind. Kleinere Anteile mögen sinnvoll sein, vor allem in Gebäuden, in denen eine energetische Modernisierung nur bedingt möglich ist (z.B. Denkmalschutz), aber auch dort erst in den späteren Dekaden des Betrachtungszeitraums. Entsprechende Einschätzungen sind in einer Vielzahl wissenschaftlicher Quellen zu finden (siehe z.B. S.10 & S.25 in [64] oder S.64 in [83]). Aus diesem Grund wird sich bewusst gegen den Einsatz von synthetischen Brennstoffen im Modell entschieden.

Bei der sukzessiven Erhöhung der Veränderungsraten der WVA fallen folgende zwei Punkte auf:

1. Reduktion von Gas WVA

Da zu Beginn des Betrachtungszeitraums Gas extensiv genutzt wird, vor allem im Bestand aber auch im Neubau, werden weiterhin sehr viele neue WVA mit Gas installiert. Damit im Modell die Anteile Gas verringert werden können, müssen die Veränderungsraten beim Gas drastisch erhöht werden. Auch die Anteile im Neubau werden auf etwas weniger als die Hälfte reduziert. Diese signifikanten Änderungen führen zu der Wärmeversorgung in Abbildung 40. Mit dem Voranschreiten im Betrachtungszeitraum wird die Installation von Gas zusehends problematisch, weil davon ausgegangen werden muss, dass die Wahrscheinlichkeit diese Anlagen vor 2050 noch zu substituieren kontinuierlich geringer wird. Wie in der Abbildung 40 zu sehen ist, wird die Wärmeversorgung auf Basis von Gas zum überwiegenden Teil durch Wärmepumpen substituiert. Selbst mit Wärmepumpenanteilen von im Durchschnitt 60 % über alle BAK und einer Reduktion von Gas auf unter 10 %, werden die Ziele für den Gebäudebestand noch nicht erreicht.

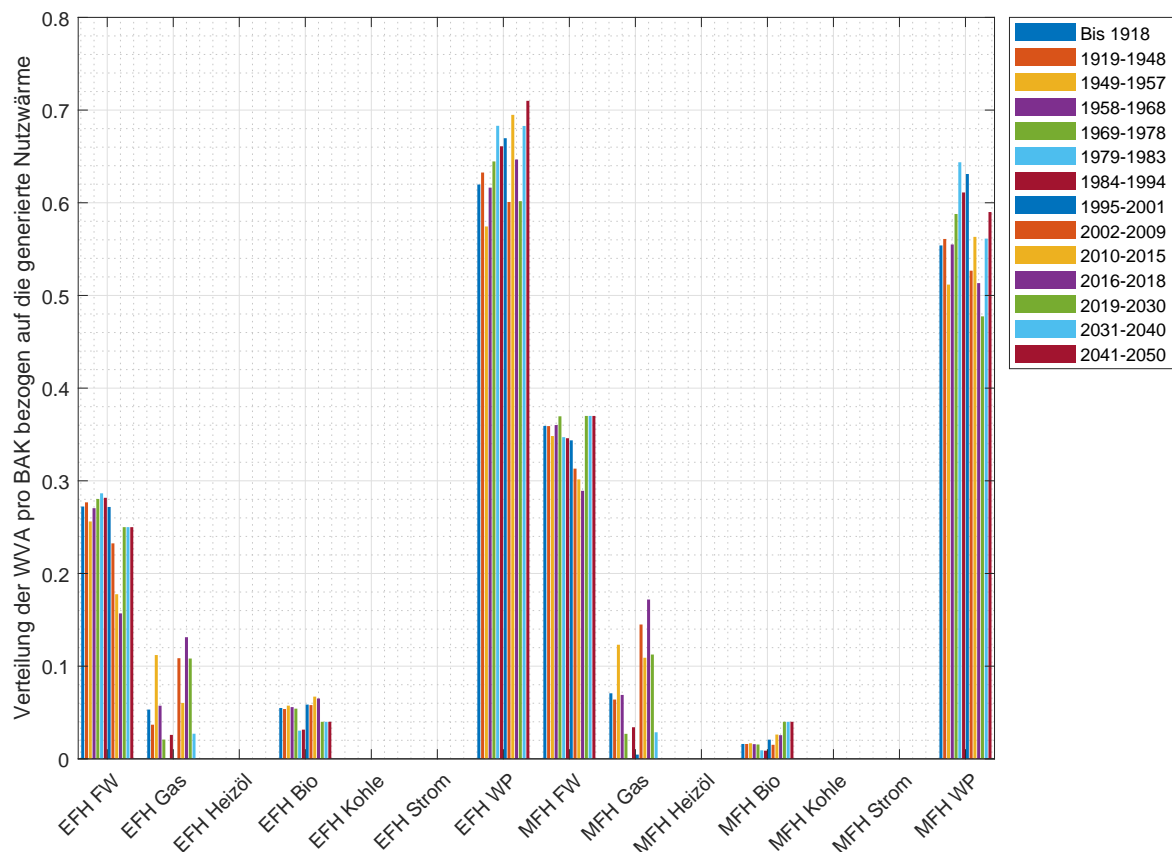


Abbildung 40: Verteilung Wärmeversorgungsanlagen pro Baualtersklasse im Szenario Moderisierung + WVA 2050

2. Restemissionen durch Strom und Fernwärme

Nach der starken Reduktion von Gas werden die Emissionen durch Fernwärme und Strom für Wärmepumpen kontinuierlich bedeutender. Deshalb werden, auch wenn Gas komplett aus dem System entfernt würde, die Ziele nicht erreicht. Für die Zielerreichung wären niedrigere Emissionsfaktoren für Strom und Fernwärme notwendig. Beispielhaft werden die Emissionsfaktoren für Strom und Fernwärme in 2050 auf $1/3$ ggü. 2049 reduziert. Der Einfluss wird in Abbildung 41 deutlich, wenn die Emissionen in 2049 mit denen in 2050 verglichen werden.

Zum Vergleich mit den vorherigen Szenarien und zur Darstellung der Endenergieversorgung sind in Abbildung 42 die Gesamtbilanzen für das Szenario dargestellt. In der Abbildung wird ersichtlich, dass 2050 in diesem Szenario mehr als 50 % des Endenergiebedarfs durch „Sonstige“ erzielt wird. Unter diese fällt die Solarthermie, Nutzung von Biomasse für Kamin und Umweltwärme/Geothermie, die durch Wärmepumpen nutzbar gemacht wird. Umweltwärme und

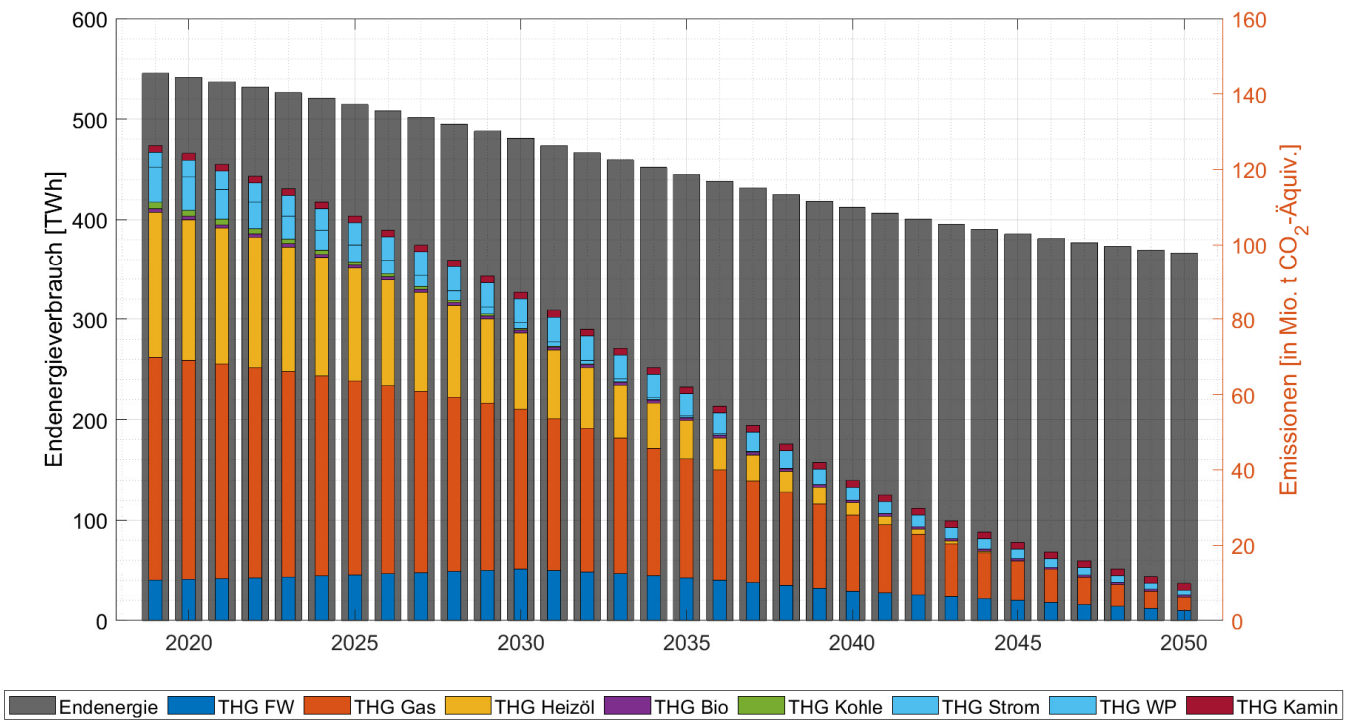


Abbildung 41: Verlauf des Endenergieverbrauchs und Emissionen im Szenario Modernisierung + WVA 2019-2050

Geothermie machen dabei durch den 2-3-fachen Anteil der Wärmepumpen den größten Anteil (61 %) aus.

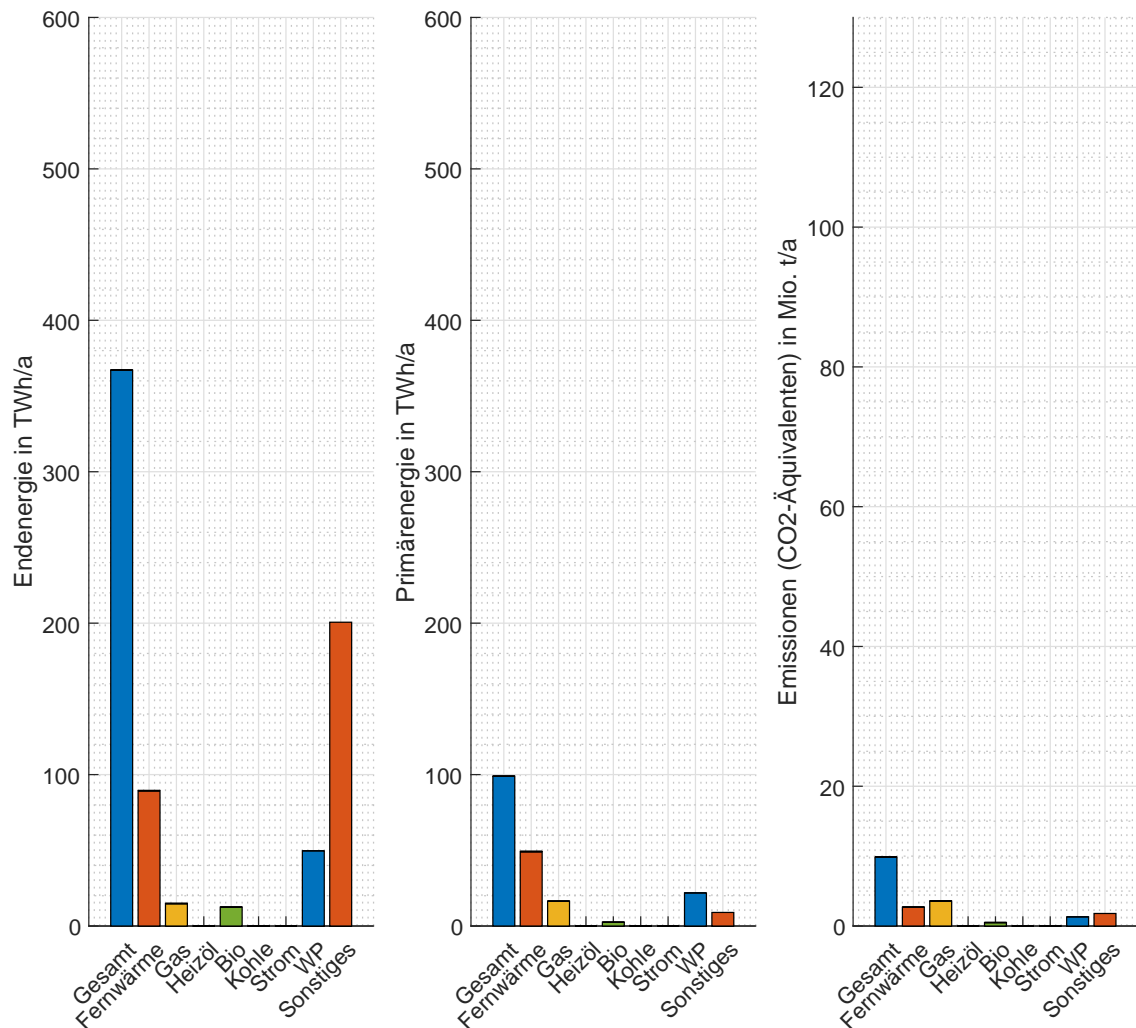


Abbildung 42: Gesamtbilanz für Endenergie, Primärenergie und THG Szenario Modernisierung + WVA 2050

4.5 Schlussfolgerung

In Kapitel 4 wird explorativ untersucht, welche Rahmenbedingungen zur Erreichung der von der Bundesregierung definierten Klimaschutzziele führen können. Hierzu wird in Abschnitt 4.1 das Trendszenario simuliert. Es zeigen sich dort bereits deutliche Fortschritte bis 2050. Diese sind allerdings nicht ausreichend. Einerseits ist der Modernisierungsgrad in 2050 mit 63,9 % bei EFH/RH und 72,3 % bei MFH für die Baualterklassen bis einschließlich 2001 ausbaufähig, andererseits verbleiben deutlich zu viele Restemissionen durch Gas und Heizöl.

Ausgehend hiervon wird in Abschnitt 4.2 die Modernisierungsrate exogen erhöht. Hier zeigt das Modell erstmals eine gewisse Problematik bei der Erhöhung der Modernisierungsrate. In Abbildung 33 wird ersichtlich, dass mit sinkenden Anteilen potenzieller Gebäude mit Sanierungsbedarf die Modernisierungsraten begrenzt werden. Damit zeigt das Modell die Problematik, die sich für die Modernisierung des Gebäudebestands aufgrund langer Lebensdauern ergibt, wenn die Sanierung als entscheidend für eine Modernisierung angesehen wird. Denn sinkt der Sanierungsbedarf, müssen andere Gründe zur Modernisierungsentscheidung führen. Naheliegender wäre hier der ökonomische Vorteil, der sich durch sinkende Energiekosten ergibt. Der Vollmodernisierungsgrad im Szenario mit erhöhter Modernisierungsrate (Abschnitt 4.2) erreicht 83,6 % aller Gebäude, wobei Neubauten im Betrachtungszeitraum ebenfalls als vollmodernisiert angesehen werden. Die höheren Modernisierungsraten führen zwar zu höheren Einsparungen und geringeren Emissionen, es verbleiben trotzdem noch ca. 40 Mio. t/a THG. Diese entfallen weiterhin hauptsächlich auf Gas. Heizöl wird im Vergleich zum Trendszenario fast gänzlich substituiert.

In Abschnitt 4.3 werden die Auswirkungen eines reduzierten Flächeneinsatzes und erhöhten Ersatzbaus betrachtet. Die in Abschnitt 3.3 postulierten Gleichungen 11-13 für Neubau, Rückbau und EFH Anteil sind hierfür nur beschränkt nutzbar. Die Einsparungen (-4,5 Mio. t/a) sind wesentlich geringer als im Szenario mit erhöhter Modernisierungsrate (-15,5 Mio. t/a) und können zu 79 % dem erhöhten Rückbau zugeschrieben werden. Ein reduzierter Flächenverbrauch kann damit als flankierende, aber nicht zentrale Maßnahme eingesetzt werden. Um die Potenziale genauer quantifizieren zu können, müssten die Effekte, die ein geringeres Flächenangebot auf den Wohngebäudebestand haben, weiter untersucht werden.

Abschließend wird in Abschnitt 4.4 eine zielführende Substitution der Wärmeversorgung auf Basis der Modernisierungsraten aus Abschnitt 4.2 untersucht. Hierzu wird ein schneller Ersatz der Gas- und Heizölanlagen durch Fernwärme und hauptsächlich Wärmepumpen simuliert. Allerdings verbleiben in 2050 trotzdem noch mehr THG als zur Zielerreichung erlaubt, da die Emissionsfaktoren der dann wichtigsten Energieträger Strom und Fernwärme eine Zielerreichung verhindern. Durch eine weitere Reduzierung der Emissionsfaktoren auf 30 g/kWh (FW) und 26,3 g/kWh (Strom) werden die Ziele erreicht. D.h. in 2050 müssten selbst bei hoher Modernisierungsrate und fast vollkommenem Ersatz fossiler Heizanlagen die Strom- und Fernwärmeerzeugung ebenfalls fast gänzlich emissionsfrei geschehen.

5 Modernisierungsraten in Abhängigkeit der Wirtschaftlichkeit

Die zuvor entwickelte Modernisierungsfunktion (Gleichung 15) wird in diesem Kapitel so verändert, dass die Wirtschaftlichkeit der Modernisierungsmaßnahmen Einfluss auf die Modernisierungsrate hat. Hierzu wird der zuvor konstante Ökonomiefaktor ($ecof_{i,j}$) in eine Funktion umgewandelt, die die wirtschaftlichen Rahmenbedingungen berücksichtigt. In den vorherigen Kapiteln wird durch den Ökonomiefaktor und die erwartete Modernisierungsrate \widehat{mod}_i , die Modernisierungsrate im Vergleich zum theoretischen Sanierungszyklus reduziert. Dies geschieht, da für die erwarteten Modernisierungsraten \widehat{mod}_i im Trendszenario Werte realer Modernisierungsraten für Altbauten eingesetzt werden. Hierdurch stellt sich eine geringere erwartete Modernisierungsrate im Vergleich zu dem theoretisch errechneten Wert bei einer Lebensdauer von 55 Jahren ein. Die erwartete Modernisierungsrate wird für die weiteren Untersuchungen mit Gleichung 16 berechnet.

Um den Einfluss veränderter wirtschaftlicher Rahmenbedingungen modellieren zu können, werden vor der Modellierung das Entscheidungsverhalten bei Modernisierungen und potenzielle Restriktionen bei der Erhöhung der Modernisierungsrate untersucht.

5.1 Prozess der Modernisierungsentscheidung

Der Prozess der Modernisierungsentscheidung wird untersucht, um entscheidende Hindernisse bei der Erhöhung der Modernisierungsrate zu identifizieren. Daneben stellt sich die Frage, ob der Eigentümer die Modernisierung als sinnvoll erachtet und trotzdem davon absieht, oder ob er sich dessen ungeachtet dagegen entscheidet. Dies wird auch in [39] empfohlen, da das Problem bzw. der Hinderungsgrund oftmals nicht rein rationaler Natur ist. Außerhalb der „Behavioral Economics“ wird in der Regel davon ausgegangen, dass Entscheidungen rational getroffen und sinnvolle Optionen genutzt werden. In der Realität ist dies oftmals aber nicht der Fall, da der Mensch nicht grundsätzlich rational handelt [39], [96]. Entsprechend kann nicht nur der Unwillen zu modernisieren, sondern auch die Umsetzung selbst ein Hemmnis darstellen. Um dies

einschätzen zu können, müssen die ökonomischen und nicht ökonomischen Faktoren für und gegen eine Modernisierung beleuchtet werden. Ist eine Modernisierung wirtschaftlich sinnvoll und wird trotzdem nicht umgesetzt, ist mit Hemmnissen in der Umsetzung zu rechnen. Andernfalls ist die Entscheidung gegen eine Modernisierung rational nachzuvollziehen und die Begründung für niedrige Modernisierungsraten mit darin zu erwarten. Die Gruppen der Selbstnutzer und Vermietenden werden untersucht und die Ergebnisse für die Modellierung genutzt.

5.1.1 Private bzw. Selbstnutzer

Die Gruppe der Selbstnutzer ist mit einem Anteil von 43 % des deutschen Wohnungsbestands die größte. Die zweitgrößte Gruppe ist die der Kleinvermieter mit 37 % [100]. Entsprechend werden ca. 80 % durch private Eigentümer gehalten. Die Gruppe „Private bzw. Selbstnutzer“ bezieht sich auf die 43 % Selbstnutzer.

Ökonomische Aspekte werden als **wichtigste Faktoren bei der Modernisierungsentcheidung** beschrieben (z.B. [80], [107]). Eine wirtschaftliche Vorteilhaftigkeit wäre damit in Kombination mit geringen Modernisierungsraten ein Indikator, dass andere nicht ökonomische Faktoren ausschlaggebend sind oder die Umsetzung das Hindernis ist. Allerdings gibt es hier eine Diskrepanz zwischen der Einschätzung zur Wirtschaftlichkeit zwischen Wissenschaft und den potentiell Umsetzenden. Viele Gebäudeeigentümer sehen die Wirtschaftlichkeit einer energetischen Modernisierung als problematisch oder zumindest als zweifelhaft an [107], [128]. Hierfür gibt es naheliegende Gründe. Einerseits werden bei einer detaillierten Betrachtung durch Experten die Sanierungskosten³⁴ als unabwendbare Kosten („Sowieso-Kosten“) deklariert und nicht mit in die Wirtschaftlichkeitsbetrachtung einbezogen. Andererseits gibt es seitens Gebäudeeigentümern eine Aversion gegen die Nutzung der Fördermaßnahmen. Beide Punkte haben kritischen Einfluss auf die Wirtschaftlichkeit. Bei einer Vollmodernisierung, also einer umfassenden Modernisierung in einem Schritt, steigt der Einfluss der Förderung durch höhere Förderquoten³⁵ und ein Verzicht auf Fördermittel führt zu einer kritischen Diskrepanz bei der Wirtschaftlichkeitsbetrachtung. Wenn beide Punkte anwendbar sind, kann die Amortisationsdauer unter 15 Jahre reduziert werden und von Wirtschaftlichkeit der Maßnahme gesprochen

³⁴Bei einer Vollmodernisierung eines Einfamilienhauses sind ca. 60 % Sowieso-Kosten und 40 % energiebedingte Mehrkosten. Die Aufteilung variiert je nach Ausführung und Gebäudeeigenschaften.

³⁵Z.B. Zuschüsse im Bereich von 40 % und mehr der Investitionskosten durch die KfW (vor Anpassung der Förderung in 2022).

werden, wobei eine Amortisationsdauer von 15 Jahren als kritische Grenze für Wirtschaftlichkeit betrachtet wird [80], [117]. Die Aversion gegen Förderung deutet auf Schwierigkeiten bei der Umsetzung hin. Durch die im Regelfall bestehende Notwendigkeit von Förderung zur Erreichung wirtschaftlicher Rahmenbedingungen bedingt dies ein nicht zu unterschätzendes Hindernis, das von den verantwortlichen Akteuren (Politik und Förderbanken) bereinigt werden sollte.

Daneben sind eine **Vielzahl der Modernisierungsbemühungen** aber **keine umfassenden**, d.h. es werden nur einzelne Komponenten, wie z.B. das Dach, modernisiert. In diesem Fall sind die Förderquoten geringer und damit auch der Einfluss auf die Wirtschaftlichkeit. Während eine umfassende, in einem Schritt durchgeführte, Modernisierung wirtschaftlich und auch hinsichtlich der Energieeinsparung vorteilhaft ggü. einer schrittweisen Modernisierung oder einer Einzelmaßnahme ist, sind Einzelmaßnahmen leichter zu finanzieren, besser mit Instandhaltungsarbeiten und einem höheren Komfort während der Modernisierung verbunden. Dies deckt sich auch mit den Einschätzungen von Praktikern³⁶ in der Umfrage in [7]. Entsprechend werden umfassende Modernisierungen zwar von Praktikern am meisten empfohlen (ca. 60 % empfehlen umfassend „auf einmal“ als Erstempfehlung) aber von den Bauherren nur bedingt (<20 %) umgesetzt [7].

Die Modernisierungsentscheidung wird durch **weitere Motive** wie Umweltschutz, Wohnqualität und Verbesserung des Wohnklimas aber auch durch Einstellungen des sozialen Umfelds beeinflusst [80]. Das soziale Umfeld und persönliche Kontakte haben dabei einen nicht zu unterschätzenden Einfluss. Als letzter Punkt ist der Einfluss kontextueller Faktoren, die als Rahmenbindungen durch die Lebenssituation der Personen im Gebäude sowie des Gebäudeeigentümers und den Eigenschaften der Immobilie resultieren, zu nennen [80].

Als Grundlage für eine Umsetzungsentscheidung bei Modernisierungen privater Eigentümer ist es hinsichtlich der Wirtschaftlichkeit sinnvoll einfache Berechnungsverfahren zu nutzen, denn kaum private Eigentümer werden detaillierte Berechnungen durchführen. Auch zeigt sich, dass das Wirtschaftlichkeitsempfinden von Sanierern eher einer gefühlten Wirtschaftlichkeit gleicht als einer berechneten oder gemessenen (siehe z.B. [70]). Dies mag auch daran liegen, dass es

³⁶ „Für die Studie wurden 836 Handwerker, Architekten, Bauingenieure, Energieberater und weitere Praktiker der Gebäudesanierung per Zufallsverfahren über die BAFA-Liste, Die Dena-Expertenliste und Haus-Sanieren-Profitieren Liste ausgewählt.“ [7]

eine Vielzahl von unterschiedlichen Methoden und grundlegende Unterschiede bei der Bewertung der Wirtschaftlichkeit gibt. Durch diese Unterschiede entsteht eine weitere Unsicherheit, da gänzlich unterschiedliche Aussagen auf dieser Basis getroffen werden können.

Einerseits muss zwischen statischen und dynamischen Berechnungsverfahren unterschieden werden und andererseits zwischen den anzusetzenden Kosten. Für die Berechnungsverfahren bildet die statische Amortisationsdauer eher die Denkweise eines Selbstnutzers ab als dynamische Methoden (z.B. Barwerte) inklusive Diskontierung. Daneben tendieren Eigentümer intuitiv dazu die Vollkosten anzusetzen. In wissenschaftlichen Betrachtungen hingegen wird der Fokus auf die energiebedingten Mehrkosten gelegt (bspw. [79], [81], [106] und [74]). Werden die Ergebnisse unterschiedlicher Methoden hinsichtlich der ungefähren Amortisationsdauer im Vergleich zur kritischen Amortisationsdauer (15 Jahre) gestellt, wird die Problematik einer angenommenen kritischen Amortisationsdauer von 15 Jahren ohne weitere Informationen offensichtlich. Werden **energiebedingte Mehrkosten** angesetzt und gleichzeitig eine Förderung in Höhe von 40 % als Zuschuss erreicht, ist es in vielen Fällen möglich die verbleibenden Kosten fast gänzlich durch die Förderung zu decken und Amortisationsdauern von wenigen Jahren zu erzielen. Es verbleibt aber weiterhin der oftmals größere Anteil der Sanierungskosten (Sowieso-Kosten) zur Finanzierung durch den Eigentümer. Wird im gleichen Fall keine Förderung genutzt, sind Amortisationsdauern im Bereich von 20-30 Jahren und ggf. länger für die Amortisation von ca. 40 % und mehr der Investitionskosten zu erwarten. Wird die Förderung anteilig auf Sowieso-Kosten und energiebedingte Mehrkosten aufgeteilt, ergibt sich die Notwendigkeit, bei einem Fördersatz von 40 %, 24 %³⁷ der Investitionskosten über Einsparungen zu amortisieren. Die zu erwartende statische Amortisationsdauer reduziert sich entsprechend auf ca. 12-18 Jahre. Werden die **Vollkosten**³⁸ angesetzt, sind die Amortisationsdauern selbst mit Förderung wesentlich höher, da sich je nach Förderanteil ca. 60 % der Investitionskosten amortisieren müssen. Ohne Förderung ist der Anteil entsprechend auf 100 % gestiegen und die Dauer ebenfalls. Zwei dieser fünf Betrachtungsweisen erzielen Amortisationsdauern im Bereich von 15 Jahren oder darunter. In einem dieser Fälle sind äußerst lukrative Amortisationsdauern zu erwarten, die nicht mit dem beobachteten Bild der Modernisierungsentscheidung und den zu beobachtenden Modernisierungsraten zusammenpassen.

³⁷ Annahme 40 % Förderung auf einen Anteil von 40 % energiebedingte Mehrkosten: Es verbleibt ein Anteil von 60 % nicht geförderter energiebedingter Mehrkosten, die 40 % der Gesamtkosten ausmachen. -> $40\% \cdot 60\% = 24\%$ der Gesamtkosten sind nicht geförderte energiebedingte Mehrkosten.

³⁸ Ohne Aufteilung von Sowieso-Kosten und energiebedingten Mehrkosten.

Zusammenfassend zeigen die vielen Studien der Thematik aus dem letzten Jahrzehnt, dass der Prozess der Modernisierungsentscheidung sehr individuell und von einer Vielzahl von Faktoren abhängt. Faktoren sind z.B. die Bausubstanz, die angedachten Maßnahmen, die Kombinierbarkeit der Maßnahmen mit anderen nicht energetischen, die persönliche Situation der Bewohner und des Eigentümers, finanzielle Leistungsfähigkeit, Zeitpunkt und Anlass wie z.B. Eigentümerwechsel und Umzug sowie weitere. Diese individuellen Faktoren können allerdings nicht einzeln in dieser Arbeit betrachtet und modelliert werden, denn jeder Faktor müsste untersucht und auf das Verhalten bei abweichenden Eingangsparameter sowie Interdependenzen zwischen den Faktoren untersucht werden. Vor allem fehlen die notwendigen Eingangsdaten in entsprechender Güte. Deshalb wird davon ausgegangen, dass ohne detaillierte Studie eine separate Betrachtung der Faktoren zu einer Verschlechterung der Modellgenauigkeit führen würde.

Die Ausschnitte aus den einzelnen Literaturquellen und Studien, die im Vorfeld benannt sind, bestätigen, dass nicht ökonomische Faktoren wichtig sind und einen Einfluss auf die Entscheidung haben, die Wirtschaftlichkeit hat in der Gesamtheit aber den höchsten Stellenwert und stellt vielfach eine Grundvoraussetzung dar. Nichtsdestotrotz ist der Prozess der Modernisierungsentscheidung sehr individuell geprägt, sodass selbst bei entsprechend guter Wirtschaftlichkeit oder auch dem Gegenteil mit Entscheidungen zu rechnen ist, die nicht dem Stand der Wirtschaftlichkeit der geplanten Maßnahme entsprechen. Zum Beispiel mag die Wirtschaftlichkeit für ein Gebäude bzw. dessen Eigentümer unter den persönlichen Ansprüchen liegen, nicht ökonomische Vorteile können dann trotzdem dazu führen, dass eine Entscheidung für eine Modernisierung getroffen wird.

Bezüglich der Bedeutung der Hemmnisse bei der Erhöhung der Modernisierungsrate kann keine eindeutige Einschätzung gegeben werden. Tatsache ist jedenfalls, dass die Wirtschaftlichkeit ein wichtiger Punkt ist und dieser kritisch von Modernisierenden betrachtet wird. Eine detailliertere Analyse der ökonomischen Situation mag Aufschlüsse darauf geben, wie kritisch die Wirtschaftlichkeit bei genauerer Betrachtung tatsächlich ist.

5.1.2 Gewerbliche und private Vermieter

Wie zuvor beschrieben sind 37 % der Wohnungen in Händen von privaten (Klein-)Vermietern. Daneben werden 8 % durch private Wohnungsunternehmen, 7 % durch öffentliche Wohnungsgenossenschaften und 6 % durch sonstige gehalten. Der verbleibende Rest sind die bereits behandelten Selbstnutzer. Die 80 % aus Selbstnutzern und privaten Kleinvermietern sind dabei für 88 % des Endenergieverbrauchs verantwortlich [100]. Der vergleichsweise hohe Endenergieverbrauch wird durch die Charakteristik der gehaltenen Gebäude bestimmt. Da diese vor allem aus EFH und kleinen MFH bestehen, ist der spezifische Verbrauch pro Wohnung entsprechend im Durchschnitt höher. Daneben weisen die Gruppe EFH und RH die geringeren Modernisierungsraten auf. Hilfreich für größere Bestandshalter (v.a. die 7 % private Unternehmen und öffentliche Wohnungsgenossenschaften) ist, dass sie aufgrund von Erfahrung und Skaleneffekten günstiger modernisieren können [103].

Nachteilig für die Modernisierungsraten bei vermieteten Objekten ist, dass Energieeffizienz zwar Auswirkungen auf den Kaufpreis hat aber deutlich weniger auf den Mietpreis [100]. Dies wird auch daran ersichtlich, dass für nur 22 %³⁹ der Mieter die Energieeffizienz ein relevantes Mietkriterium ist [21], [100]. Dies steht allerdings im Gegensatz zu den deutlich höheren Modernisierungsraten in MFH ggü. EFH/RH, wobei ca. 60 % der Geschosswohnungen in den Händen von (Klein-)Vermietern und Selbstnutzern sind. Mit dem Steigen der CO_2 -Steuer (Klimapaket 2020) und höheren Energiepreisen dürfte sich die Relevanz der Energieeffizienz für Mieter weiter steigern.

Die mit Abstand größte Gruppe der Vermietenden – die (Klein-)Vermieter – weisen Besonderheiten auf, die sie den Selbstnutzern ähneln lassen. So haben (Klein-)Vermieter meist eine emotionale Bindung zum Objekt, zum Quartier und zum Mieter [100], auch da sie zu 25 % in der gleichen Immobilie wohnen [127]. Damit sind sie zu 25 % der Fälle ähnlich wie Selbstnutzer zu behandeln, da die energetischen Modernisierungsmaßnahmen für das jeweilige Bauteil eher für das gesamte Gebäude als pro Wohnung umgesetzt werden. Auch sind sie sehr darlehensavers und neigen zu typischen Spar- und Investitionszyklen, die zumeist für ein sukzessives Sanieren genutzt werden [100]. Allerdings ist die Intention der Modernisierungsentscheidung unterschied-

³⁹Aufgrund der Energiekrise in 2022 und den damit verbundenen Energiekostensteigerungen, dürfte die Relevanz der Energieeffizienz als Mietkriterium deutlich gestiegen sein.

lich. Während ein wichtiger Grund für Selbstnutzer die Einsparung laufender Kosten ist, sind Vermieter an der Vermietbarkeit der Immobilie oder ggf. auch Wertsteigerungen interessiert. Dabei wird die Mieterhöhung in Folge der energetischen Modernisierung bei (Klein-)Vermietern seltener genutzt als bei Unternehmen, auch vermutlich um ein gutes Verhältnis mit dem Mieter zu wahren und rechtlichem Streit aus dem Weg zu gehen.

5.1.3 Zwischenfazit Eigentümergruppen

Die Gruppe der (Klein-)Vermieter als auch die Selbstnutzer sind bei der Entscheidungsfindung sehr individuell und eine Vielzahl von Einflussgrößen fließt in die Entscheidung ein. Der Anteil, der nicht durch diese zwei Gruppen abgedeckt ist, steht nur für einen Bruchteil des Endenergiebedarfs (12%) und des Bestands. Bezogen auf den Anteil der Wohnungen halten Wohnungsunternehmen, Genossenschaften und sonstige je nach Quelle 18,9% [36] oder 20% [100], nach Anzahl der Gebäude beträgt der Anteil sogar nur 6% [36].

Aus den vier folgenden Gründen sollen Objekte von gewerblichen und privaten Vermietern im Modell wie selbstgenutzte behandelt werden.

1. Private (Klein-)Vermieter weisen Ähnlichkeiten beim Investitionsverhalten mit Selbstnutzern auf. Gleichzeitig ist der Entscheidungsprozess, wie auch bei den Selbstnutzern, bei Einbezug nicht ökonomischer Faktoren sehr individuell geprägt und kann nicht in Gänze berücksichtigt werden.
2. Nur 6% der Gebäude sind nicht im Eigentum von privaten (Klein-)Vermietern und Selbstnutzern. Damit ist der Anteil der Gebäude, der nicht wie selbstgenutzte zu behandeln ist, sehr gering.
3. Modernisierungen durch Unternehmen können vergleichsweise kostengünstiger durchgeführt werden. Hierdurch wird die Relevanz eines Fokus auf von (Klein-)Vermieter gehaltene und selbstgenutzte Gebäude weiter bestärkt.
4. Die Modernisierungsraten bei MFH, die entsprechend die wichtigste Gebäudeart gewerblicher Vermieter sind, sind bereits deutlich höher als bei EFH/RH. Die größeren Hemmnisse für Modernisierungen bestehen also bei EFH/RH sowie den entsprechenden Eigentümergruppen den Selbstnutzern und (Klein-)Vermietern.

Entsprechend wird nur eine Berechnungsgrundlage genutzt, die sich an den Selbstnutzern orientiert. Dies bedeutet für vermietete Objekte ein zugrunde legen einer warmmietenneutralen Mieterhöhung (Mieterhöhung entspricht den Energiekosteneinsparungen).

5.1.4 Ökonomische Situation bei Integration Klimapakets 2020

Die derzeitigen ökonomischen Rahmenbedingungen von Modernisierungen werden anhand von Lebenszykluskostenanalysen weitergehend untersucht. Eine Auswirkung des Klimapakets 2020 auf den Wohngebäudebestand ist ebenfalls zu erwarten und wird hinsichtlich der Auswirkungen auf die ökonomischen Rahmenbedingungen durch einen Vergleich der Situation vor und nach Inkrafttreten des Klimapakets betrachtet.

Für den Vergleich werden Lebenszykluskosten zugrunde gelegt. Lebenszykluskostenanalysen sind besonders nützlich für den Vergleich der Gesamtkosten von Gebäuden, da sie eine umfassende Beurteilung der ökonomischen Machbarkeit von Konzepten ermöglichen - insbesondere von solchen mit längeren Betrachtungszeiträumen und erheblichen Zahlungen in zukünftigen Jahren. Alle Kosten werden als Barwerte unter Verwendung der gängigen Gleichungen (z.B. auch genutzt in [10], [85]) für Lebenszykluskosten (LZK) Gleichung 21 und Folgekosten (FK) Gleichung 22 berechnet. Alle Investitionskosten des Startjahres ($t=0$) sind in I_0 enthalten. Der Betrachtungszeitraum ist gleich T und wird auf 25 Jahre festgelegt⁴⁰. Das jeweilige Jahr der Betrachtung wird durch t repräsentiert. Die FK werden mit dem Diskontierungsfaktor d abgezinst und individuellen Preissteigerungsraten (z.B. Bau- oder Energiekosten) i_x auf das jeweilige Jahr hochgerechnet.

$$BW = I_0 + \sum_{t=1}^T \frac{FK_t(i_x)}{(1+d)^t} \quad (21)$$

$$FK_t(i_x) = K_t * (1 + i_x)^t \quad (22)$$

⁴⁰Der Zeitraum wird auf 25 Jahre festgelegt, da nach dieser Zeit die ersten wiederholten Modernisierungen zu erwarten sind (v.a. Heizung, Fenster). Daneben ist der Einfluss nachfolgender Jahre durch den Diskontierungsfaktor reduziert.

BW :	Barwert
FK_t :	Folgekosten im Jahr t
T :	Betrachtungszeitraum
d :	Diskontierungsfaktor
K_t :	Kosten im Jahr t
i_x :	Preissteigerungsrate der jeweiligen Komponente

Durch das Inkrafttreten des Klimapakets wird seit 2021 eine CO_2 -Steuer für die genutzte Energie in Gebäuden erhoben. Betroffen sind vor allem Gas und Heizöl. Auf Strom wird keine CO_2 -Steuer erhoben, da die Stromerzeugung bereits im Emissionshandel berücksichtigt wird. Im Jahr 2021 beginnt die CO_2 -Steuer mit einem Preis von 25 € pro Tonne CO_2 [20]. Bis 2025 wird der Preis auf 55 € pro Tonne CO_2 steigen. Nach 2025 soll der Preis durch Auktionen mit Unter- und Obergrenzen bestimmt werden. Basierend auf diesen neuen Bedingungen wurden drei Grundscenarien für die weitere Entwicklung der CO_2 -Steuer nach 2025 erstellt.

Betrachtungen der Vollkosten inkl. Förderung

Im Folgenden werden die Vollkosten inkl. Förderung für die Vollmodernisierung eines EFH unter Variation der CO_2 -Steuer, der modernisierten Wärmeversorgungsanlage und mit den Rahmenbedingungen aus 2016 und 2020 betrachtet.

Eine CO_2 -Steuer von 100 € pro Tonne entspricht einem Aufschlag von ca. 2 ct/kWh auf den Gaspreis. In den Berechnungen wurde die ausgewiesene CO_2 -Steuer auf den Verbraucherpreis für Gas aufgeschlagen. Die weitere Entwicklung nach 2025 ist beispielhaft durch verschiedene Entwicklungsszenarien berücksichtigt. Da mit diesen Szenarien basierend auf der derzeitigen CO_2 -Steuer und einem hypothetischen Verlauf nach 2025 keine Wirtschaftlichkeit innerhalb von 25 Jahren erreicht wird, werden weitere Szenarien erstellt. Vier weitere Szenarien (2.1-2.4) für die CO_2 -Steuer werden untersucht, in denen durch die Steuer ein Break-Even nach 25 Jahren bei den Vollkosten einer umfangreichen Modernisierung in einem Schritt im Vergleich zu einer einfachen Erneuerung des Wärmeversorgungssystems erreicht wird. Die unterschiedlichen Verläufe der Szenarien für die CO_2 -Steuer sind in Abbildung 43 dargestellt.

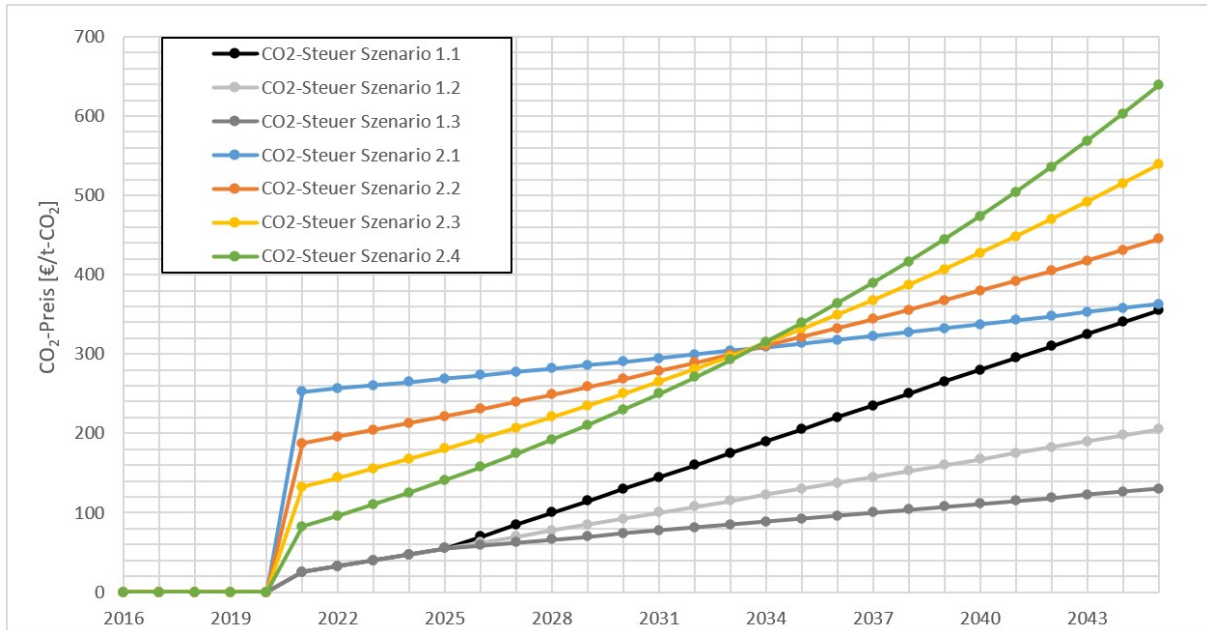


Abbildung 43: CO_2 -Preisverläufe für die LZK-Analyse

Es zeigt sich, dass für eine Amortisationsdauer von 25 Jahren die CO_2 -Steuer deutlich erhöht werden müsste und selbst dann ist die Amortisationsdauer immer noch zehn Jahre über dem als kritisch angegebenen Niveau. Das Erreichen einer Amortisationsdauer von 15 Jahren bei Betrachtung der Vollkosten inkl. Förderung ist entsprechend unrealistisch.

Neben den CO_2 -Steuer Szenarien 2.1-2.4 kann ein Break-Even auch durch höhere Förderraten erreicht werden. Dazu sollten die Barwerte der wirtschaftlichsten Modernisierungskonzepte mit den Barwerten beim einfachen Ersatz der Wärmeversorgungsanlage angeglichen werden. Eine Amortisation innerhalb von 25 Jahren wird in der LZK-Analyse erreicht, wenn die bereits erhebliche Förderung von 25 % auf 60 % (+35 %-Pkt.) der Investitionskosten bei Modernisierungen auf Basis eines Heizungssystems mit Gas und von 40 % auf 65 % (+25 %-Pkt.) bei Modernisierungen mit WP erhöht wird (jeweils bezogen auf CO_2 -Steuer Szenario 1.2). Die notwendigen Förderzuschüsse zum Erreichen der Gewinnschwelle ändern sich in Abhängigkeit vom CO_2 -Steuer Szenario und der Amortisationsdauer. Variationen von beiden für Modernisierungen mit Wärmepumpen (KfW55) sind in Tabelle 25 angegeben. Die notwendigen zusätzlichen Förderungen sind wie erwartet erheblich, um eine Amortisation innerhalb von 25 Jahren zu erreichen.

Tabelle 25: Notwendige Förderraten für Break-Even in Abhängigkeit der Amortisationsdauer der Vollkosten; am Beispiel KfW55 mit Wärmepumpen

Amortisationsdauer	25 Jahre	30 Jahre	35 Jahre	40 Jahre
KfW55 2020	40 %			
Notwendige Förderraten für Break-Even				
CO ₂ -Steuer Sz. 1.1	58,2 %	48,7 %	38,6 %	28,0 %
CO ₂ -Steuer Sz. 1.2	64,8 %	58,2 %	51,4 %	44,7 %
CO ₂ -Steuer Sz. 1.3	68,4 %	63,1 %	58,0 %	53,0 %

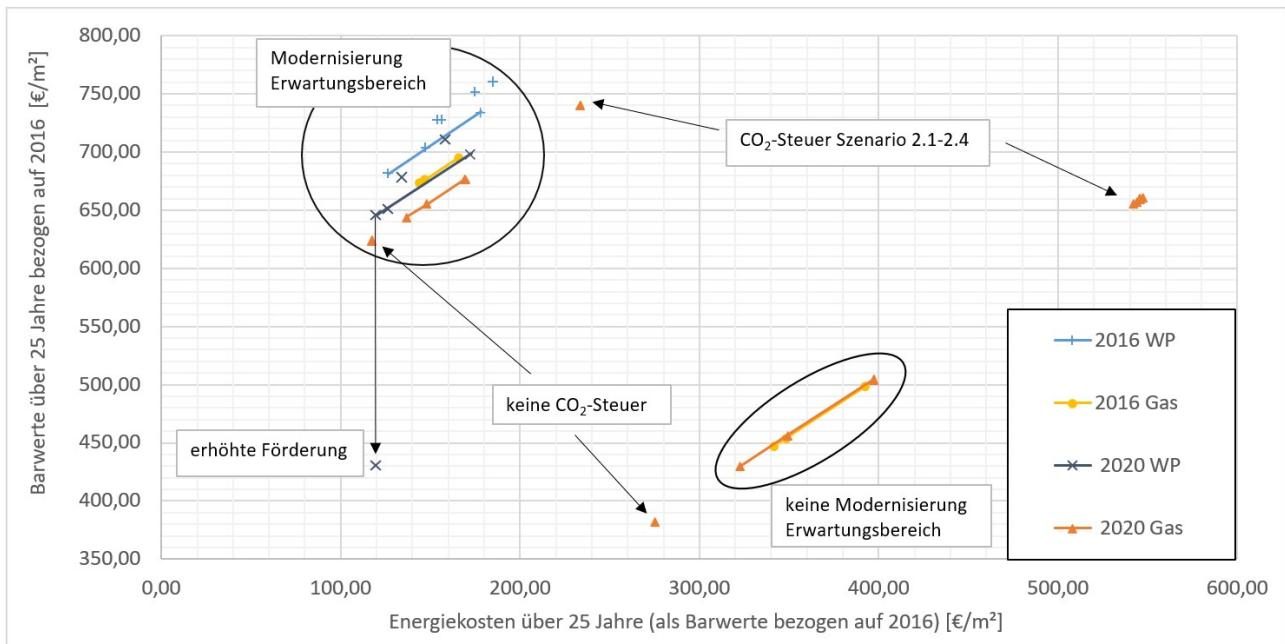


Abbildung 44: Barwerte verschiedener Modernisierungsmaßnahmen für ein EFH 2016 vs. 2020

In Abbildung 44⁴¹ sind die Ergebnisse nochmals zusammenfassend und ggü. Ergebnissen für das Jahr 2016 ohne Einfluss des Klimapakets dargestellt. Es zeigt sich, dass sich die wirtschaftlichen Rahmenbedingungen für Modernisierungen ggü. 2016 trotz des Klimapakets nicht wesentlich verändert haben (Barwerte für Modernisierung mit WP -4 %, Gas -3 %). Dies ist ein Resultat von steigenden Baupreisen und gesunkenen bzw. konstanten Energiepreisen für fossile Energieträger. Nichtsdestotrotz ist mit einer geringfügigen Steigerung der Modernisierungsraten alleine schon durch die psychologische Komponente der eingeführten CO₂-Steuer zurechenen. Während sich die wirtschaftliche Situation von Modernisierungen der thermischen Gebäudehülle nicht wesentlich geändert hat, haben sich die Aussichten für Wärmepumpen durch die CO₂-Steuer und die zu erwartenden Entlastungen bei der EEG-Umlage gebessert. Auch höhere Geschwindigkeiten beim Rückbau von Öl-Heizungen sind zu erwarten.

⁴¹In Tabelle 35 im Anhang sind die numerischen Ergebnisse und Parameter dargestellt.

Die Ergebnisse bekräftigen ebenso, dass die Wirtschaftlichkeit von Modernisierungen stark von der Sanierungsbedürftigkeit der Gebäude abhängt. Eine Entkopplung, so dass die Wirtschaftlichkeit auch bei Vollkosten inkl. Förderung gegeben ist, würde Förderzuschüsse oder CO_2 -Preise benötigen die deutlich über die hier vorgestellten hinauslaufen. Entsprechend ist eine gänzliche Entkopplung kaum realistisch.

Vergleich mit Studienergebnissen zum Klimaschutzprogramm 2030

In [73] werden die Maßnahmen des Klimaschutzprogramms 2030 untersucht und auf ihre potenziellen Einsparungen abgeschätzt. Die Autoren kommen zu folgendem Ergebnis:

„In Summe führt das Maßnahmenbündel des Klimaschutzprogramms 2030 im Gebäudesektor im Jahr 2030 zu CO_2 -Einsparungen in Höhe von rund 4,4 Mio. t.“

Damit erreichen die zu erwartenden Einsparungen (4,4 Mio. t) durch das Klimaschutzprogramm nicht die notwendigen Einsparungen (21 Mio. t) zur Einhaltung des Zwischenziels für 2030 [73]. Dies deckt sich ebenso mit den Einschätzungen auf Grundlage der Ergebnisse der Wirtschaftlichkeitsbetrachtung von Modernisierungsmaßnahmen vor und nach der Einführung des Klimaschutzprogramms 2030 (Klimapaket 2020). Zusätzliche Maßnahmen werden dadurch wahrscheinlich notwendig, um die Ziele im Gebäudesektor zu erreichen. Die Notwendigkeit wird zusätzlich durch Bemühungen der EU (Green Deal) und das Vorziehen des Zieljahrs für Klimaneutralität auf 2045 unterstrichen.

5.2 Restriktionen bei der Erhöhung der Modernisierungsrate

Es ist von einer Kapazitätsgrenze hinsichtlich der Bauvolumina im Baugewerbe auszugehen, da die Kapazität zumindest kurzfristig statisch ist. D.h. hohe Neubauraten bei gleichzeitig wesentlich erhöhten Modernisierungsraten sind bei kurzfristigen Steigerungen kritisch zu bewerten. Dies wurde bereits in den Abschnitten 4.2 & 4.4 berücksichtigt, so dass nur eine sukzessiv steigende Modernisierungsrate angenommen wurde. In diesem Fall bestände die Möglichkeit die Kapazitäten schrittweise stetig zu erhöhen. Diese Kapazitäten erstrecken sich dabei ebenfalls auf die verfügbaren Baustoffe. Sprunghafte Anstiege sind entsprechend kritisch zu hinterfragen

oder eine aktive Begrenzung in das Modell zu integrieren. Für eine aktive Begrenzung im Modell wird vorerst keine Notwendigkeit gesehen, da die beeinflussenden Parameter nicht sprunghaft geändert werden und eine reduzierte Neubautätigkeit (theoretisch frei werdende Kapazitäten für Modernisierungen) erwartet wird. Auf eine Integration wird deshalb bis auf weiteres verzichtet.

Ein Mindestmaß und damit die Notwendigkeit für Sanierungen werden durch die Nutzung der Sanierungsfunktion in Gleichung 14 & 15, selbst bei sehr schlechten ökonomischen Parametern, bereits berücksichtigt. So würde durch sehr schlechte ökonomische Parameter die Modernisierungsrate drastisch sinken, im Gegenzug aber der Sanierungsdruck stetig steigen, so dass eine stetig steigende Zahl von Gebäuden aufgrund des Sanierungsdrucks modernisiert werden. Dies kann bei zuvor sehr geringen Modernisierungsraten auch dazu führen, dass die Modernisierungsrate im späteren Verlauf trotz schlechter wirtschaftlicher Bedingungen über das Ausgangsniveau von 1%/a ansteigt.

5.3 Wirtschaftlichkeitskalkulation im Modell

Die Wirtschaftlichkeitsbetrachtung im Modell wird anhand von statischen Amortisationsdauern unter Betrachtung von Vollkosten inklusive Förderung durchgeführt. Für Amortisationsdauern wird sich aufgrund des vereinfachten statischen Charakters entschieden. Es wird angenommen, dass dies eher der typischen Wirtschaftlichkeitsbetrachtung von Privaten und Selbstnutzer entspricht (vgl. Punkte 5.1.1-5.1.3). Daneben werden Vollkosten inklusive Förderung gewählt, da einerseits verschiedene Förderhöhen berücksichtigt werden sollen und andererseits die Koppelung von Sanierung und Modernisierung durch den Sanierungsfaktor bereits in der Modernisierungsfunktion berücksichtigt wird. Auf eine Differenzierung von energiebedingten Kosten und Sowieso-Kosten wird entsprechend verzichtet.

Die Werte werden für jedes Jahr und alle Kombinationen⁴² aus Ausgangszustand und Endzustand (nach Modernisierung) kalkuliert. Grundlage dafür sind Energiepreise, der CO_2 -Preis und spezifische Modernisierungskosten.

⁴²Sieben Energieträger, 48 Gebäudemodelle, drei Modernisierungszustände.

Energiepreise

Nach Auswertung diverser potenzieller Quellen für Energiepreise werden die Preise aus [37] übernommen. Die Quelle weist eine sehr breite Datenbasis auf und deckt damit auch sehr gut die durchschnittlichen Nebenkosten ab, die neben dem Arbeitspreis anfallen. In Tabelle 26 sind die durchschnittlichen Kosten inkl. Nebenkosten, wie sie auch im Modell übernommen werden, umgerechnet in ct/kWh angegeben.

Tabelle 26: Energiepreise im Modell für das Jahr 2019 [37]

[ct/kWh]	Ø Arbeitspreis	Arbeitspreis im Modell* ¹
Fernwärme	9,10	10,59
Erdgas	6,10	7,64
Heizöl	6,70	8,15
Biomasse(Pellets)	5,10	6,95
Kohle* ²	4,95	6,15
Strom direkt* ³	22,1	26,74
Strom für WP	22,1	26,74
* ¹ : Arbeitspreis inkl. Nebenkosten (Wartung, Messungen & Betriebsstrom)		
* ² : Abschätzung da geringe Relevanz		
* ³ : Übernahme Preise von WP, tendenziell höher		

Die Preise werden inkl. Nebenkosten mit einer jährlichen Preissteigerung von 2%/a versehen. Ausnahme sind die Strompreise, welche mit 1%/a fortgeführt werden. Hintergrund sind die geplante Abschaffung der EEG-Umlage, die wissenschaftlich und politisch angestrebte Elektrifizierung der Gesellschaft und die derzeit bereits sehr hohen Steuern und Gebührenanteile beim Strom.

CO₂-Preis

Der CO₂-Preis für 2021-2025 (25-55 €/t) wird wie derzeit politisch beschlossen übernommen. Die Preise werden mit der Umsatzsteuer versehen und den Arbeitspreisen über die jeweiligen THG-Faktoren aufgeschlagen. Für den weiteren Verlauf nach 2025 werden vier theoretische Entwicklungsszenarien für den CO₂-Preis definiert (siehe Abbildung 45). Szenario a) ist eine lineare Fortführung der bereits politisch festgelegten Preise bis 2025 und damit das Trendszenario bei Nutzung der Modernisierungsfunktion in Abhängigkeit der Wirtschaftlichkeit. Die Szenarien b)-d) stellen progressive Verläufe des Preises in unterschiedlicher Stärke dar.

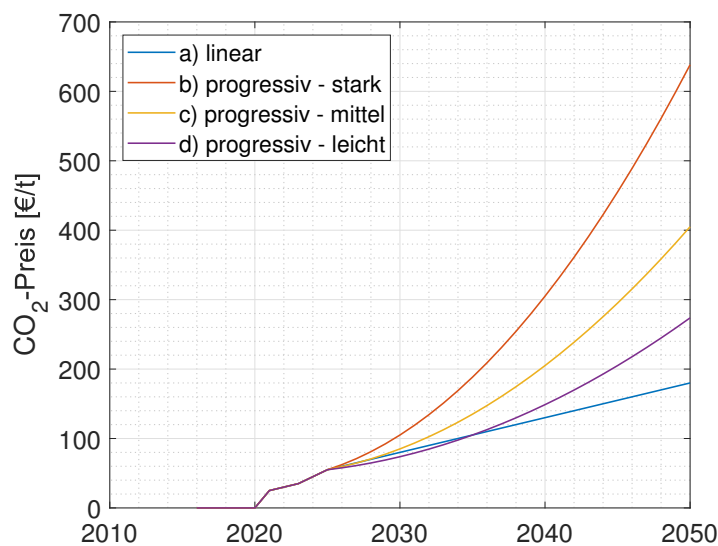


Abbildung 45: Entwicklungsszenarien für den CO_2 -Preis

Die Preise, die in den Szenarien in den späteren Jahren erreicht werden, scheinen auf den ersten Blick überhöht und drastisch. Eine frühzeitige Kommunikation solch hoher Preise ermöglicht es Eigentümern aber auch über Jahrzehnte Gegenmaßnahmen zu ergreifen. Mit stark progressiven Verläufen erhalten zukünftige wirtschaftliche Rahmenbedingungen eine höhere Gewichtung, so dass Eigentümer sich darauf frühzeitig einstellen können, ohne dass diese tatsächlich hohe CO_2 -Preise bezahlen müssen. D.h. solche Preisverläufe könnten eine hohe Hebelwirkung durch Abschreckung erzielen.

Daneben sind für deutliche Impulse auch entsprechend hohe CO_2 -Preise notwendig. Beispielsweise wurden in 2022 für Neukunden Stromtarife mit Arbeitspreisen von 40-50 ct/kWh angeboten. Ein CO_2 -Preis von 600 €/t in 2050 würde hingegen einem Aufpreis von 18,2 ct/kWh inkl. USt. auf den Gaspreis entsprechen. Damit könnte der Gaspreis inkl. der zurzeit wesentlich erhöhten Preise und zusätzlicher Preissteigerungen bis 2050 vielleicht einen Wert von 45 ct/kWh erreichen. Dies wäre selbst in 2050 niedriger als teilweise derzeitige Stromtarife, die bei Direktheizung und Durchlauferhitzern bereits jetzt höhere Wärmegestehungskosten erzeugen als ein entsprechender CO_2 -Preis von 600 €/t in 2050 bei einer Gasheizung auslösen würde. Selbst bei diesen beträchtlichen Wärmegestehungskosten werden Wärmeanwendungen mit Direktstrom weiterhin genutzt und eingebaut, was sicherlich durch geringe Investitionskosten und hohe notwendige Umrüstkosten begünstigt wird.

Die Annahmen für den CO_2 -Preis sind auch vergleichbar mit den Annahmen zur Preisentwicklung in [13]. In [13] wird von einer linearen Erhöhung des CO_2 -Preises auf ein Maximum von 275 €/t in 2040 ausgegangen. Damit ist der Verlauf in [13] vergleichbar mit dem Verlauf des maximal Szenarios b) bis 2040 (300 €/t in 2040).

Spezifische Modernisierungskosten

Die Berechnung der Investitionskosten wird über spezifische Modernisierungskosten durchgeführt. Die im Modell integrierten spezifischen Modernisierungskosten zeigt Tabelle 27.

Tabelle 27: Spezifische Modernisierungskosten pro m^2 Wohnfläche im Jahr 2021 auf Basis [63], [118] & [54]; Preise mit Baukostenindex auf 2021 angepasst

[€/m ²]	Vollkosten			Energiebedingte Mehrkosten		
	Mod 1	Mod 1 WP	Mod 2	Mod 1	Mod 1 WP	Mod 2
EFH/RH	526,94	579,94	711,36	151,49	204,49	329,34
MFH	362,27	415,27	553,28	105,39	158,39	302,99

Die spezifischen Modernisierungskosten auf Basis der dena-Sanierungsstudien ([63] & [118]) wurden mit dem Baukostenindex für Bauarbeiten im Hochbau [54] auf 2021 hochgerechnet. Das Modernisierungskonzept 1 mit Wärmepumpe wird wegen höherer Investitionskosten für die Wärmeversorgungsanlage (33 €/m²) und Wärmeverteilung (Niedertemperaturheizkörper 20 €/m²) mit 53 €/m² zusätzlich zu den Grundkosten des Modernisierungskonzepts 1 abgeschätzt. Die zusätzlichen Kosten sind ebenso energiebedingte Mehrkosten. Die Modernisierungskosten für unterschiedliche Ausgestaltungen des Modernisierungskonzepts 2 werden als identisch angenommen, da je nach Ausführung deutlich höhere Investitionskosten anfallen. Beispielsweise würde bei der Nutzung von Wärmeversorgungsanlagen mit Gas zusätzlich eine Solarthermieanlage und größerer Speicher installiert.

Für die Baukosten wird ab 2022 eine kontinuierliche Steigerung von 2%/a angenommen. Die Förderung wird je nach Konzept als direkter Zuschuss in Höhe von 27,5-40 % (KfW100-55) integriert. Für Konzepte mit Wärmepumpe werden zusätzlich 5 Prozentpunkte durch die Erreichung der EE-Klasse⁴³ ergänzt.

⁴³Zur Erreichung der EE-Klasse müssen 55 % des Energiebedarfs durch erneuerbare Energien oder Abwärme gedeckt werden. Bei Modernisierungen muss ebenfalls die Heizungsanlage Teil der Modernisierung sein. [94]

5.4 Anpassungen aufgrund Preisentwicklungen in 2021 & 2022

Im Zuge der COVID-19 Pandemie und des Ukraine-Krieges sind wesentliche Änderungen an den wirtschaftlichen Rahmenbedingungen eingetreten. Die Energiepreise haben teilweise Steigerungen von über 100% verzeichnet und der Dayahead Börsenstrompreis ist seit Juli 2021 wesentlich volatiler und von zuvor durchschnittlich 5 ct/kWh auf 10-20 ct/kWh angestiegen (siehe 2021-2022 Energy Charts [69]). Hintergrund für die gestiegenen Börsenstrompreise ist der Merit-Order-Effekt, durch den der stark gestiegene Gaspreis einen im Vergleich zum Anteil an der Stromerzeugung wesentlich erhöhten Einfluss auf die Stromgestehungskosten hat. Durch den Merit-Order-Effekt orientieren sich die Strompreise an den Stromgestehungskosten der kostenintensivsten genutzten Stromerzeugungsanlage. Die gestiegenen Gaspreise sorgen somit auch bei kleinen Anteilen überproportional für erhöhte Börsenstrompreise. Neben den Energiepreisen sind auch die Baukosten und Baustoffpreise wesentlich gestiegen. Daneben zeigen diese eine ungewohnte Volatilität auf, so dass die Kosten für den Neubau und die Modernisierung weder für den Bauherrn noch den Leistungserbringer verlässlich zu planen sind. Bauunternehmer müssen somit hohe Festpreise ansetzen oder die Preisschwankungen und damit das Risiko vertraglich an den Bauherren übertragen. Für eine Modernisierung in 2022 bedeutet das erhöhte Baukosten, erhöhtes Risiko für steigende Kosten in der Bauphase aber auch ein verbessertes Energieeinsparungspotenzial nach der Modernisierung.

Nachfolgend werden Anpassungen an den Energiepreisen und Baukosten dargestellt, die im Modell ab dem Jahr 2022 greifen.

Energiepreise

Die weitere Entwicklung zu prognostizieren ist schwierig. Selbst die Erfassung der durchschnittlichen Energiepreise für Haushaltskunden zu Beginn des Jahres 2022 stellt sich problematisch dar, denn die Bandbreite der Tarife ist derzeit sehr groß. Neukunden müssen tendenziell höhere Arbeitspreise pro kWh zahlen als Bestandskunden, da Energieversorger für jeden neuen Kunden ggf. kostenintensiv zusätzliche Energie wie Gas oder Strom einkaufen müssen. Energieversorger, die langfristig geplant haben und Kunden über bestehende Verträge kostengünstig beliefern können, bieten deutlich geringere Arbeitspreise an. Bauherren, die ihren Energieträger

aufgrund einer Modernisierung wechseln, treten z.B. für den Bezug von Wärmepumpenstrom als Neukunden auf und müssen deutlich höhere Preise zahlen. Der BDEW gab in der Strompreisanalyse 2022 für Haushaltskunden einen Durchschnittspreis von 36,19 ct/kWh an [17]. In der nachfolgenden Tabelle 28 sind Tarifangebote für Gas und Strom beispielhaft für die Städte Kaiserslautern, Berlin, Düsseldorf und München dargestellt. Ebenso sind Einkaufspreise für Pellets und Heizöl aufgelistet.

Tabelle 28: Arbeitspreisvergleich verschiedener Energieträger im April 2022; Arbeitspreise pro kWh ohne Berücksichtigung der Grundgebühr und weiterer Kosten; dargestellt jeweils der günstigste Preis entsprechender Vergleichsportale im Internet (Check24.de, verivox.de, heizoel24.de, heizpellets.de)

[ct/kWh]	Günstigster Arbeitspreis im April 2022					
Ort	Kaiserslautern	Berlin	Düsseldorf	München	Durchschnitt	vgl. 2019
Strom WP	39,10	29,90	38,70	39,10	36,70	+66 %
Strom	39,63	32,80	41,03	40,52	38,50	-
Erdgas	15,29	15,22	15,29	14,93	15,18	+149 %
Heizöl	11,92	12,12	11,68	11,79	11,88	+77 %
Pellets	11,66	15,26	12,13	10,93	12,50	+145 %

Tabelle 28 ist eine Momentaufnahme und als solche zu interpretieren, da die Energiepreise zum Zeitpunkt der Betrachtung eine hohe Volatilität aufweisen. So ist beispielsweise der Heizölpreis von ca. 17 ct/kWh im Vormonat um 30 % auf ca. 12 ct/kWh gesunken. Weiterhin wird ersichtlich, dass die Preise im Vergleich zu der Betrachtung in Tabelle 26 signifikant gestiegen sind (66-149 %). Daneben wird auch eine nicht unwesentliche regionale Abhängigkeit der Preise ersichtlich (siehe Strom oder Pellets in Berlin). Somit haben die Energiepreise eine höhere Preissteigerung innerhalb eines Jahres erfahren als bei einer konservativen Betrachtung innerhalb von 30 Jahren bei einer kontinuierlichen Steigerung von 2 % pro Jahr zu erwarten wäre (+81 %). Eine Prognose zur weiteren Entwicklung der Preise ist entsprechend schwierig. Deshalb soll neben einer kurzen Einschätzung ein breites Spektrum verschiedener Preisentwicklungen betrachtet werden.

Für die Gas- und Heizöl Preise wird vorerst ein weiterhin hohes Niveau erwartet. Langfristig nach politischer Entspannung und dem Ausklingen der Nachwirkungen der COVID-19 Pandemie sind stabilisierende Effekte und leicht sinkende Marktpreise denkbar. Hohe Preise könnten allerdings den Willen für schnellen Klimaschutz mit dem politischen Ziel von weniger Import-

abhängigkeit verbinden, so dass eine Wende schneller vorangetrieben wird. Ein Mittel hierzu könnten schneller steigende CO_2 -Preise sein. Die Situation am Strommarkt ist derzeit ebenfalls sehr angespannt. Im Juli 2022 ist der Strompreis durch die Abschaffung der EEG-Umlage⁴⁴ gesunken. Daneben ist der Preis derzeit wesentlich an die Preise für die fossilen Brennstoffe gekoppelt. Fallen die Preise für Öl und besonders für Gas, sinken auch die Strompreise. Eine Umstrukturierung des Strommarktes kann ebenfalls Potenziale für sinkende Strompreise generieren. Da der Merit-Order-Effekt derzeit sehr ausgeprägt ist, könnten Gewinne von Kraftwerken mit niedrigeren Gestehungskosten begrenzt werden. Die weitere Umstellung des Strommarktes hin zu Erneuerbaren führt zu einem erhöhten Bedarf an Flexibilität, welche vermutlich preissteigernd wirken wird. Daneben zeigen die Stromgestehungskosten von Erneuerbaren aber ebenso kostensenkendes Potenzial. Letztlich ist eine voranschreitende Elektrifizierung aller Sektoren politisch gewollt, so dass stabile und bezahlbare Strompreise wesentliches Ziel der politischen Akteure sein sollten. In Summe sind die Aussichten für die Strompreise damit besser als für fossile Energien.

Für die Energiepreise im Jahr 2022 werden prozentuale Anpassungen vorgenommen, die 2/3 der prozentualen Erhöhung in Tabelle 28 entsprechen. Hintergrund sind die erhöhten Arbeitspreise für Neukunden in Tabelle 28 und dass die prozentualen Steigerungen nicht auf weitere Kosten wie die Grundgebühr anwendbar sind. Die angepassten Energiepreise für 2022 sind in Tabelle 29 dargestellt. Für Fernwärme wird der bereits öffentlich zugängliche Verbraucherpreisindex aus [57] angewendet. Kohle wird in der Anpassung aufgrund geringer Relevanz nicht gesondert berücksichtigt. Daneben werden die in den Simulationen betrachteten Preissteigerungen der Energieträger auf eine Bandbreite von -1 bis +4 % pro Jahr erweitert (vgl. Abschnitt 5.3 1-2 %/a).

⁴⁴2021: 6,5 ct/kWh, 2022: 3,7 ct/kWh. [28]

Tabelle 29: Energiepreise im Modell ab 2022; Arbeitspreis inkl. Nebenkosten (Wartung, Messungen & Betriebsstrom); (eigene Darstellung auf Basis [37] & Tabelle 28)

[ct/kWh]	2019	Anpassung für 2022
Fernwärme	10,59	12,21
Erdgas	7,64	15,23
Heizöl	8,15	12,33
Biomasse(Pellets)	6,95	13,67
Strom direkt	26,74	38,50
Strom für WP	26,74	38,50

Baukosten & Baustoffpreise

Der Baupreisindex für Februar 2022 weist eine Erhöhung von 14,3 % ggü. dem Vorjahr Februar 2021 auf [56]. Den höchsten Anstieg verzeichnen die Zimmer- & Holzarbeiten mit 33,9 % im Vergleich zum Vorjahr. Damit sind die Baukosten bis zum Februar 2022 substantiell gestiegen, aber nicht in dem Maße wie die Energiekosten. Bedacht werden muss, dass ggf. bis zum Februar 2022 nur Teile der erhöhten Baustoffpreise auf den Baupreisindex durchgeschlagen sind, da viele Verträge vorher zu einem Festpreis vereinbart wurden. In diesen Fällen werden die höheren Baustoffpreise durch den Bauunternehmer übernommen. Der Baupreisindex für August⁴⁵ 2022 weist eine weitere signifikante Steigerung von 9,4 % im Vergleich zum Februar 2022 und 25 % im Vergleich zum Februar 2021 auf. Der Baupreisindex für August 2022 wird für 2022 genutzt und die Anpassungen werden in das Modell ab dem Jahr 2022 integriert. Die resultierenden Modernisierungskosten sind in der Tabelle 30 dargestellt.

Tabelle 30: Angepasste spezifische Modernisierungskosten im Jahr 2022 auf Basis Tabelle 27 & [56] (Preise mit Baupreisindex auf August 2022 angepasst)

[€/m ²]	Vollkosten			Energiebedingte Mehrkosten		
	Mod 1	Mod 1 WP	Mod 2	Mod 1	Mod 1 WP	Mod 2
EFH/RH	658,68	724,93	889,20	189,36	255,61	411,68
MFH	452,84	519,09	691,60	131,74	197,99	378,74

Sinkende Baukosten sind derzeit nicht zu erwarten. Verringern sich die weltweiten Lieferengpässe, kann mit geringeren Baustoffpreisen gerechnet werden. Daneben ist durch die stark gestiegenen Energiepreise und den Druck des Klimaschutzes ein hoher Bedarf an bestimmten Technologien (z.B. Dämmmaterialien, Heizungstechnik) und bestimmten Handwerksleistungen zu erwarten, die durch Kapazitätsgrenzen und Fachkräftemangel einer möglichen Entspannung

⁴⁵Die Veröffentlichungen finden quartalsweise statt (August 2022 = drittes Quartal).

entgegenwirken. Die gestiegenen Baukosten in Tabelle 30 werden deshalb als Ausgangsbasis genutzt und weiterhin mit einer 2 % Steigerung pro Jahr versehen.

5.5 Entwicklung der Modernisierungsfunktion in Abhängigkeit der Wirtschaftlichkeit

Es werden unterschiedliche Resonanzen verschiedener Eigentümer auf Veränderungen der Wirtschaftlichkeit erwartet. Deshalb werden in einem ersten Schritt die Eigentümer in unterschiedliche Typen aufgeteilt. Diese Typen werden in Anlehnung an [117] in drei Gruppen charakterisiert.

Ausgangsbasis sind die definierten fünf Entscheidertypen⁴⁶ in [117]:

1. Überzeugte Energiesparer, Anteil: 25 %
Merkmale: überproportional jung ($2/3 < 50$ Jahre alt), engagiert, intrinsische Motivation zu modernisieren
2. Aufgeschlossene Skeptiker, Anteil: 29 %
Merkmale: überproportional alt ($1/2 > 50$ Jahre alt), prinzipiell offen ggü. Modernisierungen, kurze Zeithorizonte
3. Unreflektierte Instandhalter, Anteil: 12 %
Merkmale: überproportional alt (überwiegend über 50 Jahre), führen notwendige Maßnahmen entsprechend Expertenempfehlung durch
4. Desinteressierte Unwillige, Anteil: 14 %
Merkmale: hoher Anteil 60-70 Jährige, Kosten sparen hat Priorität, kurze Zeithorizonte
5. Engagierte Wohnwertoptimierer, Anteil: 20 %
Merkmale: Altersgruppen zwischen 30-50 Jahren leicht überrepräsentiert, besitzen junge Gebäude, Modernisierungsmaßnahmen deshalb noch nicht im Fokus, stattdessen Fokus auf Verbesserung des Wohnwerts

⁴⁶Diese werden ebenfalls in [114] genutzt.

Die fünf Entscheidertypen werden hinsichtlich potenzieller Einflüsse von Amortisationsdauern auf das Modernisierungsverhalten in drei Gruppen kategorisiert. Die Bezeichnungen der Gruppen orientieren sich einerseits an den bestehenden Bezeichnungen und an der Einstellung gegenüber Modernisierungen unabhängig davon, ob diese Einstellung als verständlich (z.B. Rentner die keinen Kredit mehr aufnehmen wollen) zu beurteilen ist oder nicht.

Die erste Gruppe bleibt identisch mit dem ersten Typ aus [117] und zeichnet sich durch eine hohe Motivation und Umweltbewusstsein aus. Deshalb wird von Modernisierungen auch ohne entsprechende wirtschaftliche Rahmenbedingungen ausgegangen. Daneben wird ebenfalls von einem Einfluss der Amortisationsdauern, allerdings in geringerem Maße, ausgegangen.

Die zweite Gruppe im Modell sind die „Ökonomen“ und bestehen aus den Typen „aufgeschlossene Skeptiker“ und „engagierte Wohnwertoptimierer“. Beide Typen sind Modernisierungsmaßnahmen ggü. aufgeschlossen. Bei entsprechend wirtschaftlichen Rahmenbedingungen wird auch mit einer höheren Neigung zur Umsetzung von Modernisierungen gerechnet. Der Einfluss niedriger Amortisationsdauern wird entsprechend stärker gewichtet.

Die dritte Gruppe sind die „Unreflektierten und Desinteressierten“ und bestehen aus den Typen der „unreflektierten Instandhalter“ und „desinteressierten Unwilligen“. In dieser Gruppe sind Modernisierungen hauptsächlich Ergebnis notwendiger Sanierungstätigkeiten. Es wird aber davon ausgegangen, dass diese Gruppe sich durch gute wirtschaftliche Rahmenbedingungen trotzdem beeinflussen lässt. Folglich wird diese Gruppe langsamer modernisieren und Modernisierungstätigkeiten werden – außer bei sehr guten wirtschaftlichen Rahmenbedingungen – im wesentlichen von der Sanierungsnotwendigkeit bestimmt.

Entscheidertypen (Gruppen) im Modell:

1. Überzeugte Energiesparer/Ökomodernisierer, Anteil: 25 %

Merkmale: modernisieren auch bei nicht wirtschaftlichen Rahmenbedingungen, lange Zeithorizonte werden eher akzeptiert durch junges Alter

Ausgangsgleichung Einfluss Amortisationsdauer: $f_a(AD) = a_1/AD + a_2$

2. **Ökonomen** (aufgeschlossene Skeptiker, engagierte Wohnwertoptimierer), Anteil: 49 %

Merkmale: Energie sparen hat keine Priorität, sind offen ggü. neuester Technik, wirtschaftliche Maßnahmen werden ergriffen

Ausgangsgleichung Einfluss Amortisationsdauer: $f_b(AD) = (b_1/AD)^2 + b_2 \mid b_2 < a_2$

3. **Unreflektierte & Desinteressierte** (unreflektierte Instandhalter, desinteressierte Unwillige), Anteil: 26 %

Merkmale: Sanierungsnotwendigkeiten sind ausschlaggebend, Wirtschaftlichkeit ist nur bei sehr guten Rahmenbedingungen entscheidend

Ausgangsgleichung Einfluss Amortisationsdauer: $f_c(AD) = (c_1/AD)^2 + c_2 \mid c_2 < a_2$

Die Parameter $(a_1, a_2, b_1, b_2, c_1, c_2)$ der Ausgangsgleichungen sollen so eingestellt werden, dass sie einerseits die Merkmale der Gruppen sinnvoll widerspiegeln und zu den vergangenen Modernisierungsraten passen. Dazu werden die im Modell berechneten Vollkosten inkl. Förderungen genutzt.

Es werden die Parameter wie folgt gewählt und ergeben die Gleichungen 23, 24 und 25 (siehe auch Funktionsverläufe in Abbildung 46).

$$f_a(AD) = 15/AD + 0,8 \quad (23)$$

$$f_b(AD) = (15/AD)^2 + 0,45 \quad (24)$$

$$f_c(AD) = (8/AD)^2 + 0,45 \quad (25)$$

Ein Vergleich der Ergebnisse der Gleichungen mit Prognosen für 2030 (z.B. [73] hinsichtlich des Einflusses des Klimaprogramms 2030) zeigt deutliche Unterschiede bei den resultierenden Modernisierungsraten. Die Ergebnisse in [73] oder [13]⁴⁷ weisen geringere kurzfristige Erfolge bis 2030 auf. Daneben zeigt das entwickelte Modell, im Gegensatz zu [73] oder [13], in allen Szenarien deutliche Tendenzen, dass die Modernisierungsrate durch das Kopplungsprinzip nur sehr begrenzt für längere Zeit auf erhöhtem Niveau gehalten werden kann. Inwiefern die Prognose

⁴⁷Das Trendszenario basiert wie auch [73] auf dem Invert/EE-Lab Modell.

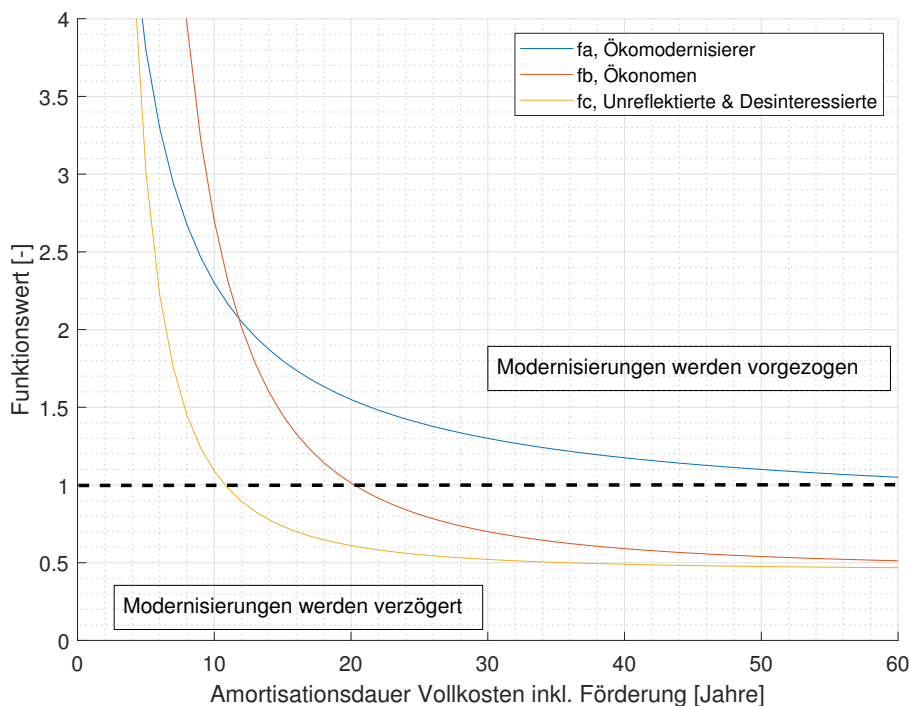


Abbildung 46: Vergleich der Funktionsverläufe für die drei Gruppen im Modell

über das Modell bessere Ergebnisse liefert, kann zu diesem Zeitpunkt noch nicht festgestellt werden. Eine Änderung der eingestellten Parameter, so dass diese mit Ergebnissen aus anderen Modellen vergleichbar sind, wird nicht als sinnvoll angesehen. Vielmehr werden die unterschiedlichen Ergebnisse als Möglichkeit gesehen, ein anderes Verhalten in Betracht ziehen zu können. Eine Validierung kann am besten durchgeführt werden, sobald belastbare Daten zur derzeit sehr volatilen Situation mit den Ausschlägen der wirtschaftlichen Parameter im Vergleich zu den resultierenden Ergebnissen auf den Wohngebäudebestand zur Verfügung stehen.

Die Aufteilung der Typen in nicht modernisierten Gebäuden im folgenden Jahr ($t+1$) wird durch den Anteil der Modernisierenden an der Modernisierungsrate der Baualtersklasse neu berechnet. Wie in Abbildung 46 zu erkennen ist, sind Modernisierungen ohne hohe Sanierungsbedürftigkeit zu Beginn des Betrachtungszeitraums mit entsprechenden wirtschaftlichen Rahmenbedingungen (Amortisationsdauer 30-50 Jahre) vor allem durch „Ökomodernisierer“ zu erwarten. Dadurch sinkt in Hochpotenzial-Gebäuden der Anteil der „Ökomodernisierer“. Nur bei sehr guten wirtschaftlichen Rahmenbedingungen (Amortisationsdauer <11 Jahren) würden die „Ökonomen“ schneller modernisieren als die „Ökomodernisierer“.

Die Summe der Funktionswerte der drei Gruppen mit ihrem jeweiligen Anteil in dem Jahr und Baualtersklasse ergeben die neuen Ökonomiefaktoren ($ecof_{i,j}(n)$, siehe Gleichung 15). Die ausgewählten Parameter resultieren in sinnvollen Ergebnissen für die Modernisierungsraten und auch die erhöhten Modernisierungsraten der Mehrfamilienhäuser bilden sich bei der Nutzung der Gleichung 23-25 wieder in Folge besserer Wirtschaftlichkeit aus.

Die entwickelten Gleichungen 23-25 dienen in Kombination mit den jeweiligen Anteilen der Modernisierungsgruppen ($ecotyp_{a-c,i,j}(n)$) im zugehörigen Jahr und der Gebäudeklasse zur Berechnung der Ökonomiefaktoren ($ecof_{i,j}(n)$) wie in Gleichung 26 dargestellt.

$$ecof_{i,j}(n) = ecotyp_{a,i,j}(n) * f_{a,i,j}(n) + ecotyp_{b,i,j}(n) * f_{b,i,j}(n) + ecotyp_{c,i,j}(n) * f_{c,i,j}(n) \quad (26)$$

In Tabelle 31 sind mit den Jahren 2020 und 2021 beispielhaft die Ökonomiefaktoren vor und nach der Anpassung durch das Klimapaket (Einführung der CO_2 -Steuer und erhöhte Förderung) für die älteren Baualtersklassen gegeben. Es ergeben sich erhöhte Ökonomiefaktoren im Jahr 2021, die je nach Einfluss auf Gebäudeklasse und -typ im Durchschnitt bei +5% liegen. Die Ökonomiefaktoren der MFH sind 14% über denen der EFH. Damit fällt der Unterschied zwischen den Modernisierungsraten der EFH und MFH verglichen mit dem Unterschied (+27%) vergangener Modernisierungsraten geringer aus. Dies kann darauf hindeuten, dass die Steigung der Ökonomiefaktoren zu gering und die Grundwerte (a_2, b_2, c_2) zu groß gewählt sind. Da die erhöhten Modernisierungsraten der MFH aber nicht gänzlich der höheren Wirtschaftlichkeit zugeordnet werden können, werden die Parametereinstellungen beibehalten.

Durch die Funktionsverläufe in Abbildung 46 und die resultierenden Ökonomiefaktoren (vgl. Tabelle 31) ergibt sich ein Modernisierungsgeschehen im Modell, das die wirtschaftliche Bewertung durch unterschiedliche Eigentübertypen in Verbindung mit der Sanierungsnotwendigkeit des Gebäudes berücksichtigt. Dies führt in 2022, abgesehen von der Gruppe der Ökomodernisierer, zu einem Verzögern der Modernisierungen. Durch den steigenden Druck der Sanierungsnotwendigkeit werden die Modernisierungen zeitlich verzögert im Vergleich zum theoretischen Sanierungszyklus durchgeführt. Das Kopplungsprinzip ist damit im Modell fest verankert, kann aber durch gute wirtschaftliche Rahmenbedingungen zum Teil ausgehebelt werden.

Tabelle 31: Ökonomiefaktoren ($ecof_{i,j}(n)$) in den Jahren 2020 und 2021 für die Altbau-Baualtersklassen

2020	bis 1918	1919-1948	1949-1957	1958-1968	1969-1978
EFH	0,6899	0,6827	0,6620	0,6464	0,6499
DH/RH	0,6516	0,6552	0,6628	0,6178	0,6317
kl. MFH	0,7391	0,7929	0,7614	0,7228	0,7160
gr. MFH	0,7031	0,7545	0,7509	0,7324	0,7054
2021	bis 1918	1919-1948	1949-1957	1958-1968	1969-1978
EFH	0,7233	0,7131	0,6941	0,6786	0,6775
DH/RH	0,6791	0,6792	0,6888	0,6353	0,6538
kl. MFH	0,7837	0,8468	0,8081	0,7615	0,7563
gr. MFH	0,7399	0,7992	0,7934	0,7721	0,7409

5.6 Integration der Modernisierungsfunktion in Abhängigkeit der Wirtschaftlichkeit in das Gebäudemodell

Da es 98 mögliche Modernisierungsvarianten⁴⁸ pro Gebäudeklasse gibt, würde dies zu 4.704 möglichen Varianten führen. Anstatt alle Varianten in den Gleichungen 23-25 bzw. Gleichung 26 einzubeziehen, wird die Anzahl möglichst auf relevante Varianten reduziert.

Zielenergieträger

Die Verfügbarkeit von Fernwärme ist abhängig von lokalen politischen und strategischen Entscheidungen von Energieunternehmen (z.B. auf Basis der Bedarfsdichte MWh/km²a). Derzeit bietet sich die Möglichkeit zum Wechsel auf Fernwärme nur in sehr begrenzten Fällen. Daneben werden Entscheidungen im Zuge der verpflichtenden kommunalen Wärmeplanung jüngst überarbeitet und sind noch nicht kommuniziert. Fernwärmeanschlüsse werden sehr wahrscheinlich deutlich zunehmen, der Umfang ist aber noch kaum abzuschätzen, da auch die Fernwärme vor deutlichen Herausforderungen vor dem Hintergrund der Wärmewende steht. Der Eigentümer ist allerdings nicht der entscheidende Akteur.

Unter der Annahme, dass Biomasse aus Gründen der begrenzten Verfügbarkeit nicht vermehrt als Energieträger zur Verfügung steht, ein Wechsel auf Fernwärme nicht allein aus den Wirtschaftlichkeitsbetrachtungen privater Entscheidungsträger entsteht und Kohle, Heizöl sowie Di-

⁴⁸zwei Modernisierungstiefen, sieben Energieträger, sieben Ausgangsenergieträger.

rektstromnutzungen keine zukunftsfähigen Modernisierungsvarianten sind, werden **Gas und Wärmepumpen** als entscheidende Optionen für die Entscheidung des Eigentümers im Modell angesehen.

Ausgangsenergeträger

Bei den Ausgangsenergeträgern werden die Betrachtungen analog auf die entscheidenden Energeträger reduziert. Für Wärmepumpen, Fernwärme und Biomasse wird angenommen, dass diese bei Modernisierung keinen Energeträgerwechsel vollziehen. Bei Direktstromheizungen und Kohle wird ein schneller Rückgang der verbleibenden Systeme erwartet. Dies wird mit der nicht zeitgemäßen Nutzung von Kohle und der wirtschaftlich sehr nachteiligen Kombination von hohen Energiebedarfen und hohen Strompreisen bei Direktstromheizungen⁴⁹ begründet. Es verbleiben **Gas und Heizöl**, welche im Ausgangszustand ca. 80 % aller bestehenden Anlagen darstellen (siehe Abbildung 21).

Als Konsequenz werden für die Bestimmung der Wirtschaftlichkeit von Modernisierungen als Eingangswert für die Gleichungen 23-25 die Amortisationsdauern der Modernisierungsvarianten von zwei Modernisierungstiefen, zwei Zielenergeträgern und zwei Ausgangsenergeträgern pro Gebäudeklasse und -alter berücksichtigt. Die relevanten Amortisationsdauern aus den Modernisierungstiefen pro Gebäudeklasse werden gemittelt, nach Anteil der Zielenergeträger und Ausgangsenergeträger gewichtet und in die Gleichungen 23-25 bzw. 26 eingesetzt. Für die Gewichtung der Zielenergeträger bedarf es als letzten Schritt noch der Entscheidung des Eigentümers für einen Energeträger.

Die Entscheidung des Eigentümers für einen Zielenergeträger (Gas oder Wärmepumpe) nach der Modernisierung wird anhand der entsprechenden gemittelten Amortisationsdauern berechnet. Das Modell entscheidet anhand einer Normalverteilung (siehe Gleichung 27), ob der Eigentümer sich bei der Modernisierung für eine Wärmepumpe oder Gas entscheidet. Eine Normalverteilung wird als sinnvoll angenommen, da aufgrund der großen Zahlen (Anzahl Modernisierungen pro Jahr) so ein realitätsnahes Entscheidungsverhalten simuliert werden kann. Für ein von der Normalverteilung abweichendes Entscheidungsverhalten (z.B. links oder rechtslastig) bestehen nicht genügend empirische Daten.

⁴⁹Direktstromheizungen können in höchsteffizienten Gebäuden eine sinnvolle Option sein. Damit sind diese aber ohne einen Fokus auf höchste Dämmstandards als Sonderlösungen zu betrachten.

Weiterhin muss die in Punkt 3.3.4 vorgestellte Berechnungsmechanik für die Entwicklung der Heizungsverteilung angepasst werden. Jährlich werden 10 % der „veralteten“ Energieträger wie Kohle, Direktstrom und Heizöl ausgetauscht. Eigentümer von Anlagen mit veralteten Energieträgern wechseln ohne gleichzeitige Vollmodernisierung auf Gas oder entscheiden sich ebenfalls auf Basis wirtschaftlicher Überlegungen zwischen Wärmepumpen und Gas bei einer gleichzeitig einhergehenden Vollmodernisierung. Für Fernwärme sowie Biomasse wird aus den bereits zuvor genannten Gründen eine feste Zubaugeschwindigkeit definiert. Für Gas wird von einer Austauschrate von 5%/a auf Grundlage einer theoretischen Lebensdauer von 25 Jahren und einem erhöhten Alter des Anlagenbestands ausgegangen. Für diese 5%/a besteht nur für den Anteil der Anlagen, die mit einer Vollmodernisierung einhergehen, die Möglichkeit einen Energieträgerwechsel zur Wärmepumpe zu vollziehen. Da die Austauschraten für Wärmeversorgungsanlagen aufgrund kürzerer Lebensdauern wesentlich höher sind als die Vollmodernisierungsrate, verbleibt eine Anzahl weiterhin eingebauter Gasanlagen.

$$x_{i,j}(n) = AD_{gas,i,j}(n)/(AD_{gas,i,j}(n) + AD_{WP,i,j}(n)) \quad (27)$$

$$\mu = 0,5, \sigma = 0.1$$

In Abbildung 47 sind die Anteile der Zielenergieträger bei gleichzeitiger Vollmodernisierung für die Jahre 2020-2022 exemplarisch dargestellt. Demnach wird im Modell in 2020 ein Anteil von 50-60 % an Wärmepumpen in allen Gebäudealtersklassen und -typen (EFH, RH, MFH) infolge der Modernisierung installiert⁵⁰. Im Jahr 2021 steigt der Anteil der Wärmepumpen nach Einführung der CO_2 -Steuer und Anpassung der Förderung auf 60-70 % an. In 2022 steigt dieser Anteil nochmals deutlich durch die hohen Gaspreise auf Anteile von bis zu 90 %. Auffällig sind die geringeren Anteile für Wärmepumpen bei den jüngeren Baualtersklassen (vgl. rechte Balken pro Gebäudetyp in Abbildung 47). Hintergrund ist die sinkende Wirtschaftlichkeit der Modernisierung bei jüngeren Gebäuden, so dass aufgrund hoher Amortisationsdauern bei Gas als auch der Wärmepumpe das Modell keinen deutlichen wirtschaftlichen Vorteil ausmachen kann.

Somit sind die Modernisierungsraten im Modell in Abhängigkeit der wirtschaftlichen Rahmenbedingungen vollständig definiert.

⁵⁰Zu beachten ist, dass die Anteile sich nicht auf die Modernisierung mit Biomasse oder Fernwärme auswirken. Fernwärme und Biomasse werden mit den bereits zugrunde liegenden Rahmenbedingungen aus den vorherigen Kapiteln weiterhin ebenfalls nach einer Modernisierung genutzt.



Abbildung 47: Verteilung der Nutzung von Gas und Wärmepumpe nach Modernisierung pro BAK und Gebäudetyp in 2020-2022 (exkl. Biomasse & Fernwärme)

5.7 Anwendung der Modernisierungsfunktion in Abhängigkeit der Wirtschaftlichkeit im Modell

Die in Abschnitt 5.5 und 5.6 entwickelte Modernisierungsfunktion in Abhängigkeit der Wirtschaftlichkeit wird im Folgenden mit den in Abschnitt 5.3 und 5.4 definierten wirtschaftlichen Eingangswerten angewendet.

In Abbildung 48 sind die Vollmodernisierungsraten insgesamt und pro Baualterklasse der CO_2 -Preisszenarien a)-d) dargestellt. In Szenario a) zeigt sich eine ungefähre Modernisierungsrate

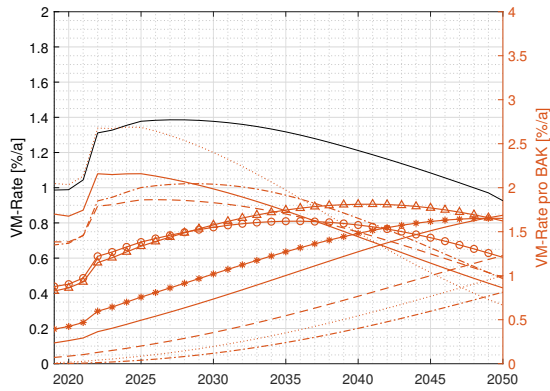
von 1 %/a⁵¹ bis zur Einführung des CO_2 -Preises in 2021. Die Vollmodernisierungsrate steigt um 5 % auf 1,04 %/a in 2021 in Folge der Einführung des CO_2 -Preises und der verbesserten Förderungsmodalitäten. In 2022 folgt eine weitere Steigerung auf 1,31 %/a, diesmal in Folge der veränderten Baukosten und Energiepreise. Bis 2028 steigt die Vollmodernisierungsrate bis auf ein Maximum von 1,39 %/a an. Danach fällt die Vollmodernisierungsrate stetig bis zum Ende des Betrachtungszeitraums 2050 trotz des steigenden CO_2 -Preises, da die Anzahl sanierungsbedürftiger Gebäude mit hohem Einsparpotenzial abnimmt und die neueren Gebäude, die vermehrt in den Sanierungszyklus eintreten, eine schlechtere Wirtschaftlichkeit von Modernisierungen aufweisen.

Die Szenarien b)-d) sind bis einschließlich 2025 identisch. Danach beginnen unterschiedliche Verläufe für den CO_2 -Preis. In Szenario b) steigt der CO_2 -Preis am schnellsten und im Gegensatz zu den Szenarien a), c) und d) steigt auch die Vollmodernisierungsrate bis zu einem Maximum in 2035 bei 1,46 %/a an. Auch wenn der CO_2 -Preis gerade nach diesem Zeitraum die schnellste Steigerung erfährt, gelingt es nicht die Modernisierungsraten nach 2035 weiterhin auf diesem hohen Niveau zu halten. In 2049 wird für die Baualtersklasse 1949-1957 als erste und einzige Baualtersklasse das Maximum (bzw. die Vollmodernisierung) erreicht, nach dem nur noch denkmalgeschützte Gebäude⁵² in dieser Baualtersklasse keine Vollmodernisierung aufweisen. Die Szenarien c) und d) stellen Mittelwege der Szenarien a) und b) dar und weisen keine Besonderheiten bei den Vollmodernisierungsraten auf.

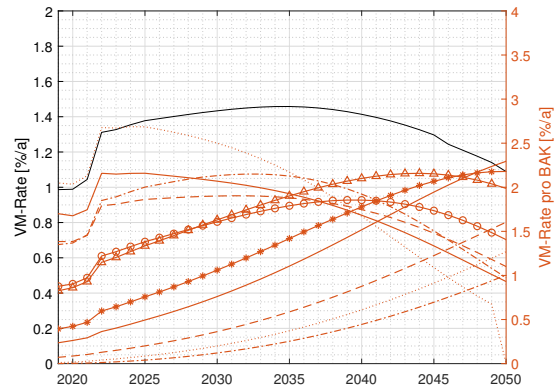
In Abbildung 49 sind die Anteile der Vollmodernisierung in 2050 der Szenarien a) und b) gegenübergestellt. Es zeigen sich in beiden Szenarien höhere Modernisierungsanteile für Mehrfamilienhäuser. Daneben zeigen sich leicht erhöhte Modernisierungsanteile für Einfamilienhäuser im Vergleich zu den Reihenhäusern. Vor allem Gebäude ab der Baualtersklasse 1979-1983 weisen noch Potenziale für Modernisierungen in beiden Szenarien auf. In Szenario a) sind die Gebäude dieser Baualtersklasse zu 66-74 % modernisiert. In Szenario b) werden dagegen in der gleichen Baualtersklasse Modernisierungsanteile von 72-81 % erreicht. Der hohe CO_2 -Preis des Szenarios b) resultiert vor allem ab 2035 in erhöhten Modernisierungsraten dieser Baualtersklasse. Dies wird auch in Abbildung 48 ersichtlich. Ab der Baualtersklasse 2002-2009 werden in beiden Szenarien

⁵¹ 2017: 0,94 %/a, 2018: 0,96 %/a, 2019: 0,99 %/a, 2020: 0,99 %/a, 2021: 1,04 %/a.

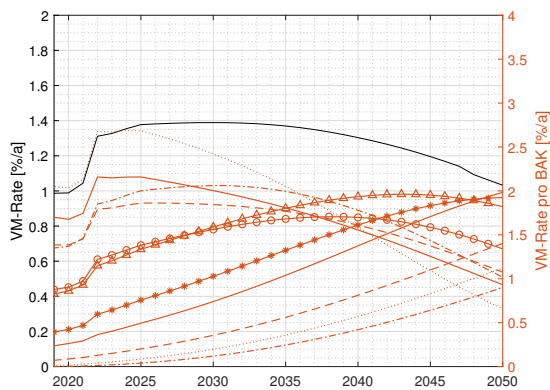
⁵² Theoretisch können denkmalgeschützte Gebäude ebenso modernisiert werden. Allerdings mit deutlich abweichendem Aufwand und tendenziell auch nur beschränkt auf hohe Effizienz-niveaus.



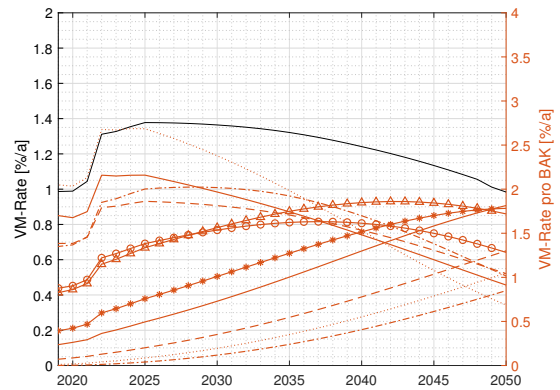
(a) Lineare Entwicklung CO_2 -Steuer



(b) Progressive (stark) Entwicklung CO_2 -Steuer



(c) Progressive (mittel) Entwicklung CO_2 -Steuer



(d) Progressive (leicht) Entwicklung CO_2 -Steuer



Abbildung 48: Vollmodernisierungsraten insgesamt und per Baualtersklasse (BAK) in Abhängigkeit der Wirtschaftlichkeit; die VM-Raten beziehen sich jeweils auf die Gesamtmenge der BAK bzw. den gesamten Wohngebäudebestand inklusive Neubau.

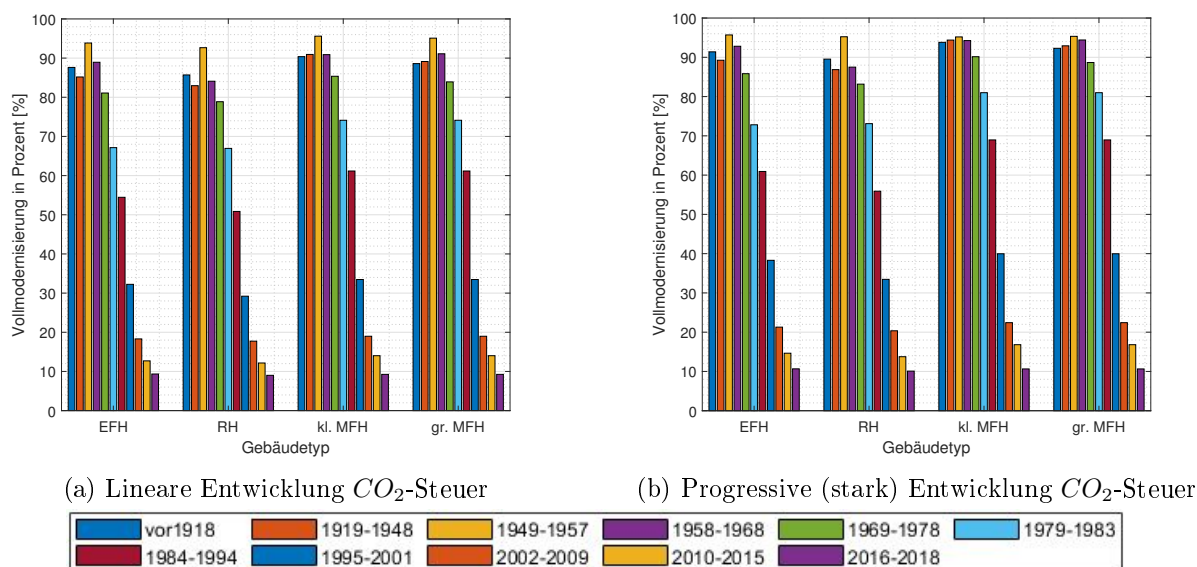


Abbildung 49: Vollmodernisierungsanteile der Baualtersklassen in 2050

rien nur noch Modernisierungsanteile von unter 20 % erreicht. Für die Baualtersklassen 2019+ wird, aufgrund des hohen energetischen Ausgangszustands und der geringen Sanierungsnotwendigkeit, von keinen Modernisierungen ausgegangen. Insgesamt zeigen sich keine deutlichen Steigerungen der Vollmodernisierungsanteile durch das stark progressive CO_2 -Preis Szenario b) im Vergleich zur linearen Steigerung in Szenario a).

In Tabelle 32 sind die vier Szenarien hinsichtlich durchschnittlicher modernisierter Anteile in 2050, der Endenergie und den THG-Emissionen in 2050 gegenübergestellt. Zum Vergleich der Auswirkungen unterschiedlicher Modernisierungstiefen sind ebenfalls Ergebnisse mit 0 und 100 % Modernisierungsanteil der höheren Modernisierungstiefe (Modernisierungskonzept 2) aufgelistet. Diese Ergebnisse beziehen sich jeweils auf die Annahme der gleichen Modernisierungsraten in den entsprechenden Szenarien.

Die Ergebnisse in Tabelle 32 legen nahe, dass die Erhöhung der Modernisierungstiefe die effizientere Methode im Vergleich zur Erhöhung der Modernisierungsraten ist. Zwar haben die erhöhten Modernisierungstiefen deutlichen Einfluss auf den Endenergiebedarf (-15 %-Punkte 100 % Mod 1 vgl. mit 100 % Mod 2), steigern im gleichen Zug aber auch die CO_2 -Vermeidungskosten. In Abbildung 50 sind zur Verdeutlichung die Vermeidungskosten, also die Modernisierungskosten pro

Tabelle 32: Ergebnisse Szenarien a)-d) vollmodernisierte Anteile, Endenergie und THG-Emissionen in 2050

	Sz. a)	Sz. b)	Sz. c)	Sz. d)
Vollmodernisierter Anteil alle BAK bis 1978				
EFH	86,79 %	90,58 %	88,62 %	87,37 %
RH	84,26 %	87,94 %	85,94 %	84,78 %
kl. MFH	89,86 %	93,11 %	91,46 %	90,35 %
gr. MFH	88,84 %	92,26 %	90,53 %	89,41 %
Vollmodernisierter Anteil alle BAK bis 2001				
EFH	73,01 %	77,72 %	75,20 %	73,70 %
RH	70,48 %	74,72 %	72,39 %	71,07 %
kl. MFH	79,17 %	83,52 %	81,22 %	79,81 %
gr. MFH	78,43 %	82,90 %	80,56 %	89,41 %

Endenergie 2050 in TWh/a

35 % Mod 2	397,31	387,24	392,57	395,82
Δ Endenergie 2019-2050				
0 % Mod 2	-21,8 %	-23,2 %	-22,5 %	-22,0 %
35 % Mod 2	-27,1 %	-28,9 %	-27,9 %	-27,3 %
100 % Mod 2	-36,8 %	-39,6 %	-38,1 %	-37,2 %

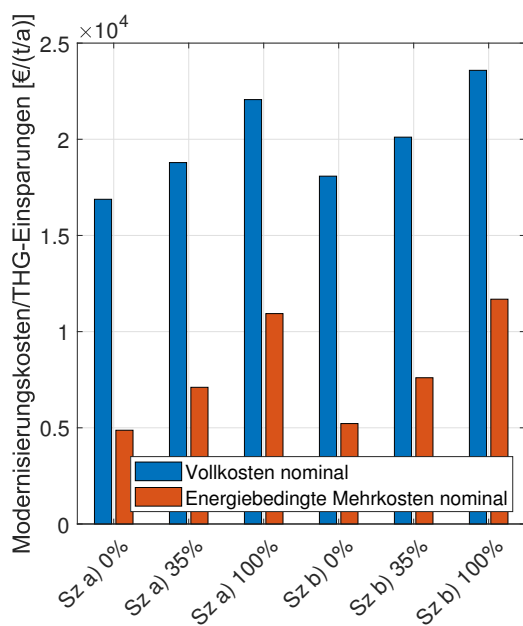
THG-Emissionen 2050 in Mio. t/a

35 % Mod 2	31,33	29,2	30,29	31,00
Δ THG-Emissionen 2019-2050				
0 % Mod 2	-72,8 %	-74,4 %	-73,5 %	-73,0 %
35 % Mod 2	-74,8 %	-76,5 %	-75,6 %	-75,1 %
100 % Mod 2	-78,6 %	-80,5 %	-79,5 %	-78,9 %

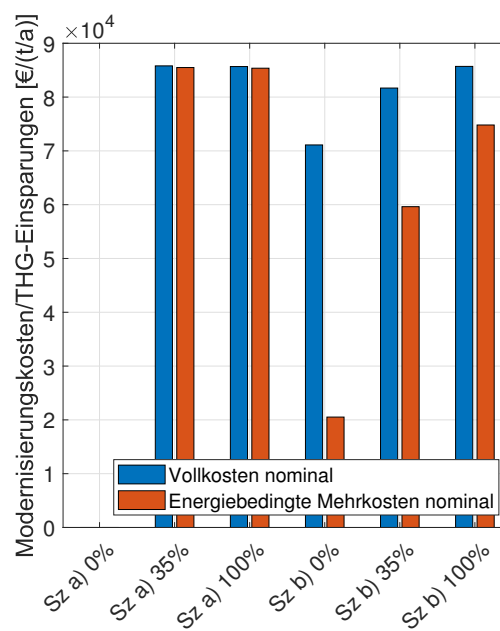
eingesparter Tonne THG-Emissionen, abgebildet. Abbildung 50 a) zeigt, dass die nominalen⁵³ Vollkosten pro eingesparter Tonne sich mit Erhöhung der Modernisierungstiefe steigern. Dies gilt ebenso für die energiebedingten Mehrkosten. Letzteres ist wenig verwunderlich, denn die gesteigerten Vollkosten sind 1:1 energiebedingte Mehrkosten.

Wird stattdessen das CO_2 -Preisszenario a) mit b) und identischer Modernisierungstiefe betrachtet, ist zwar ebenso eine Steigerung ersichtlich, diese fällt aber verglichen mit den höheren Modernisierungstiefen deutlich geringer aus. Der Hintergrund wird in Abbildung 50 b) ersichtlich. In Abbildung 50 b) sind die zusätzlichen Modernisierungskosten pro ergänzend eingesparter Tonne verglichen mit den Werten aus CO_2 -Preisszenario a) und 0 % Modernisierungskonzept 2 dargestellt. Eine Erhöhung der Modernisierungstiefe führt zu gestiegenen Vollkosten die 1:1

⁵³Ohne Baukostensteigerung; die realen Kosten Verhalten sich analog.



(a) Modernisierungskosten gesamt pro gesamt eingesparter THG-Emissionen



(b) Differenz der Modernisierungskosten bezogen auf zusätzlich eingesparte THG-Emissionen im Vergleich zu Szenario a) 0 %

Abbildung 50: Vergleich der Vermeidungskosten für unterschiedliche Modernisierungstiefen und CO_2 -Preisszenario a) & b)

auch energiebedingte Mehrkosten⁵⁴ sind. Die zusätzlichen Modernisierungskosten für eine erhöhte Modernisierungsrate in Szenario b) 0 % vgl. mit der Referenz Szenario a) 0 % sind deutlich niedriger als die zusätzlichen Modernisierungskosten, wenn die Modernisierungstiefe erhöht wird. Weiterhin sind nur ein Teil der zusätzlichen Kosten auch energiebedingte Mehrkosten, da weitere Modernisierungen mit sowieso Kosten bzw. Instandhaltungsmaßnahmen ausgelöst werden. Hierbei muss bedacht werden, dass die Kosten allerdings durch die Erhöhung der Modernisierungsrate vorgezogen werden. Dies wird in der Abbildung nicht berücksichtigt. Daneben zeigt sich, dass die zusätzlichen Modernisierungskosten in allen Szenarien deutlich über den durchschnittlichen in Abbildung 50 a) liegen. Dies ist auf sinkende Einsparpotenziale bei den Modernisierungen und sinkende Emissionsfaktoren für Fernwärme und Strom zurückzuführen.

In Abbildung 51 sind die Verläufe für Endenergie und THG-Emissionen jeweils für die Szenarien a) und b) dargestellt. Verglichen mit den Ergebnissen aus Kapitel 4 (vgl. bspw. Abbildung 41) zeigt sich eine deutlich schnellere Reduktion der THG-Emissionen und der Endenergie, da be-

⁵⁴Der geringfügige Unterschied zwischen Vollkosten und energiebedingten Mehrkosten bei Sz a) 35 % & Sz a) 100 % ist auf Rundungsfehler zurückzuführen.

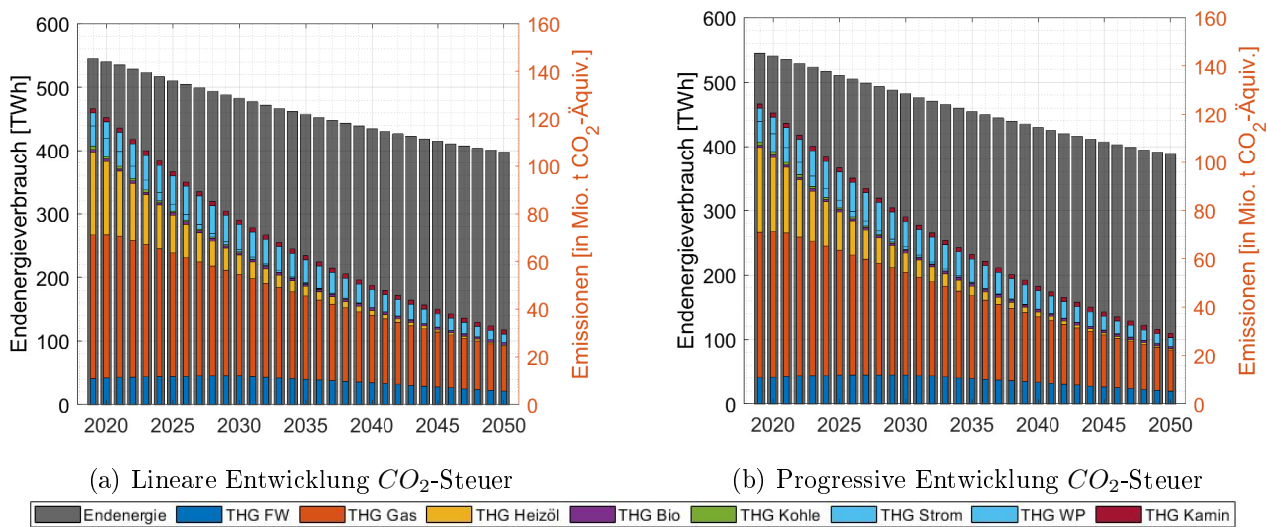


Abbildung 51: Endenergie und THG-Verlauf bei endogen berechneten Ökonomiefaktoren und Förderbedingungen 2021

reits zu Beginn des Betrachtungszeitraums die Modernisierungsraten durch die veränderten Bedingungen in 2021 und 2022 ansteigen. Darüber hinaus sind die Verläufe der Szenarien sehr ähnlich. Dies ist auch dadurch bedingt, dass bereits ohne Änderungen am CO_2 -Preis durch die Anpassungen in 2022 bei der Modernisierungsentscheidung fast ausschließlich Wärmepumpen eingesetzt werden (vgl. 80-90 % WP 2022 in Abbildung 47).

Sensitivitätsanalyse Energiepreissteigerungen

Wie sich Änderungen der Energiekosten im Modell auswirken, ist in Abbildung 52 dargestellt. Abbildung 52 a) stellt die Auswirkungen unterschiedlicher Preissteigerungsraten für Gas und Wärmepumpenstrom gegenüber. Es werden die prozentualen THG-Einsparungen in 2030 und 2050 gegenüber der Standard-Energiepreissteigerung pro Energieträger dargestellt. In Abbildung 52 b) wird die Preissteigerungsrate auf den genutzten Standard zurückgesetzt und stattdessen der Startpreis in 2022 prozentual auf Basis der Preisanpassungen 2022 geändert. Die Auswirkungen auf die Einsparungen sind in 2050 deutlich stärker als auf 2030, da die Energiepreisanpassungen über einen längeren Zeitraum wirken und durch das exponentielle Wachstum auch deutlich stärkere Auswirkungen auf den Energieträgerpreis haben.

Die Abbildungen 52 a) & b) zeigen auch, dass negative Auswirkungen (die zu höheren THG-Emissionen führen), durch niedrigere Gaspreise und höhere Strompreise für Wärmepumpen,

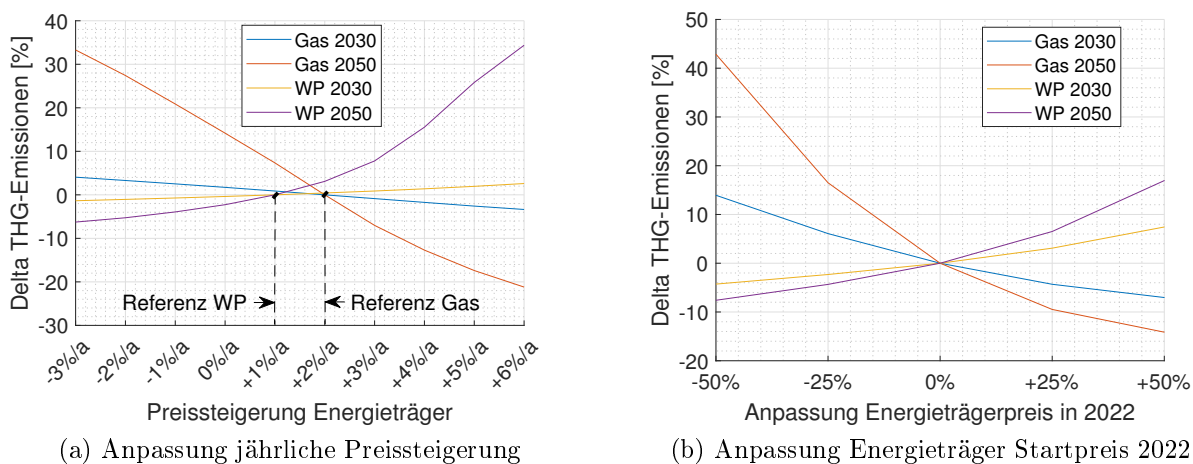


Abbildung 52: Sensitivitätsanalyse Energiekosten

stärker ausfallen als die positiven durch steigende Gaspreise und niedrigere Strompreise (z.B. -16 % ggü. +10 % THG-Einsparungen bei +/-25 % für Gas in 2050).

5.8 Angepasste Fördermodalitäten 2022

In 2022 wurden die Fördermodalitäten abermals geändert, was, sofern davon ausgegangen wird, dass eine Förderung in Anspruch genommen wird, erhebliche Auswirkungen auf die Wirtschaftlichkeit hat. Um diese Auswirkungen auf die Ziele der Wärmewende und die Modernisierungsrate darzustellen, werden die sich ergebenden Ergebnisse im Folgenden aufgeführt.

In Tabelle 33 sind die übernommenen Förderanpassungen im Modell aufgelistet. Da die Förderhöhen sich auf die komplette Modernisierung der thermischen Gebäudehülle und Heizungsanlage anwenden lassen, sinken die Förderhöhen im Vergleich zu 2021 in 2022 um 22,5 %-27,5 %-punkte. Für eine Vollmodernisierung eines Einfamilienhauses fallen somit bei den angenommenen derzeitigen Modernisierungskosten 22.200-33.300 Euro und mehr an Förderung weg. Diese wegfallende Förderung durch Energieeinsparungen zu kompensieren, ist selbst bei Gaspreisen von 15 ct/kWh ein langwieriger Prozess. Bei einem Verbrauch von 20.000 kWh/a ergeben sich 3.000 €/a, die bei einer 50 %-igen Einsparung frühestens nach 14,8 Jahren⁵⁵ zu einer Amortisation allein für die wegfallende Förderung führen.

⁵⁵Statische Amortisation, ohne Diskontierung.

Tabelle 33: Anpassungen der Förderhöhen im Modell ab 2022

	2021	ab 2022
Modernisierungskonzept 1 (KfW100)	27,5 %	0 %
Modernisierungskonzept 1 WP (KfW100WP)	32,5 %	10 %
Modernisierungskonzept 2 (KfW55)	40 %	15 %
Modernisierungskonzept 2 WP (KfW55EE)	45 %	20 %

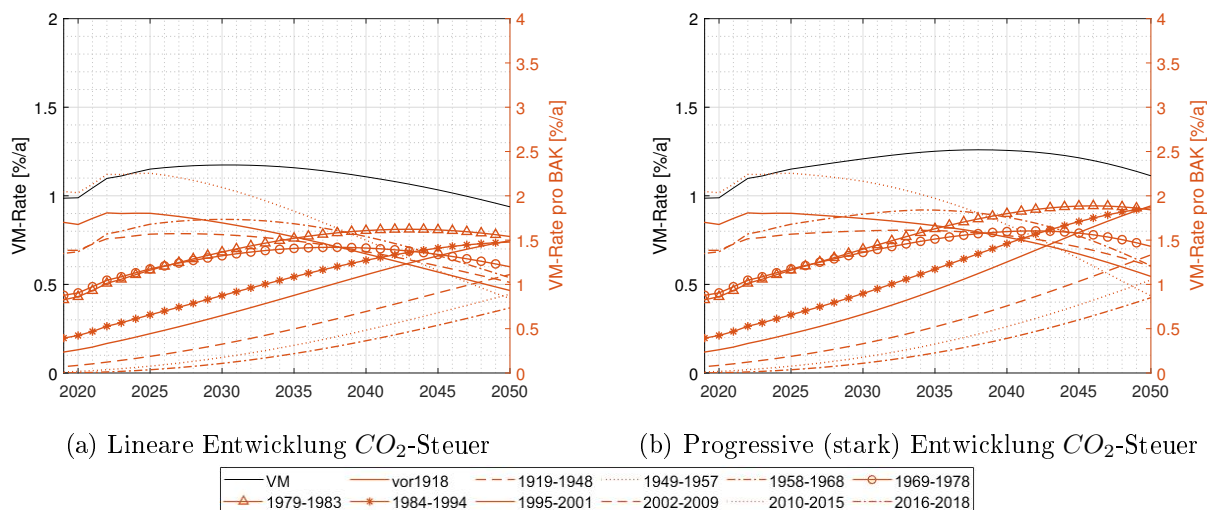


Abbildung 53: Vollmodernisierungsraten mit angepasster Förderung 2022; die VM-Raten beziehen sich jeweils auf die Gesamtmenge der BAK bzw. den gesamten Wohngebäudebestand inklusive Neubau.

In Abbildung 53 wird ersichtlich, dass durch die Anpassung der Förderung eine deutliche Steigerung von 2021 auf 2022 ausbleibt. Dies geschieht, da in 2022 der erhöhte wirtschaftliche Reiz zu modernisieren, welcher trotz wesentlicher Baukostensteigerungen durch die gestiegenen Energiepreise entsteht, durch die gesunkene Förderung annähernd auf das Niveau von 2021 zurückfällt.

5.9 Schlussfolgerungen

In Abschnitt 5.1 konnte gezeigt werden, dass die Wirtschaftlichkeit von Modernisierungsmaßnahmen bei Betrachtung von Vollkosten problematisch ist. Daraus wird aus wirtschaftlicher Sicht eine Sanierungsnotwendigkeit für Modernisierungen abgeleitet. Dies deckt sich mit Erkenntnissen aus der Literatur, in der diese Abhängigkeit auch als Kopplungsprinzip bezeichnet wird (siehe bspw. [84] oder [79]). Damit wird die Nutzung des Sanierungsfaktors als wichtiger Entscheidungsparameter für die Modernisierung bestätigt. Weiterhin lässt sich daraus ableiten,

dass die wirtschaftlichen Rahmenbedingungen zur Zeit ein wichtiger begrenzender Faktor sind, der einer Steigerung der Modernisierungsrate entgegenwirkt.

Im Laufe des Jahres 2022 haben sich die wirtschaftlichen Rahmenbedingungen für Modernisierungen wiederholt wesentlich verändert. Deshalb sind veränderte Rahmenbedingungen wie gestiegene Baupreise und Energiekosten sowie die angepasste Förderung explizit berücksichtigt.

Die Entwicklung der mathematischen Gleichungen für die Ökonomiefaktoren wird in Abschnitt 5.5 durchgeführt. Entscheidend für die Berechnungen der Ökonomiefaktoren sind die Parameter in den Gleichungen 23-25. Die Wahl der Parameter für die Entscheidertypen der Eigentümer hat deutlichen Einfluss auf das Modernisierungsverhalten im Modell. Hauptsächlich gibt es zwei Verhaltensparameter, die beeinflusst werden können:

1. Die Steigung: Die Auswirkungen wirtschaftlicher Veränderungen auf die Modernisierungsrate.

Parameter: a_1, b_1, c_1

2. Der Grundwert: Neigung auch ohne wirtschaftliche Vorteilhaftigkeit aufgrund von intrinsischer Motivation oder der Sanierungsnotwendigkeit zu modernisieren.

Parameter: a_2, b_2, c_2

Damit das Modell realistische Ergebnisse für die Jahre 2017-2021 bei Anpassung der Parameter berechnet, können Steigung und Grundwert (abgesehen von Detailanpassungen und Variationen für die Entscheidertypen) nur in Kombination miteinander verändert werden. D.h. es gibt streng genommen nur einen Freiheitsgrad. Dadurch kann die Einstellung der Parameter in den Gleichungen 23-25 in folgenden Jahren mit weiteren Fixpunkten schnell und einfach validiert oder verbessert werden. Hierfür muss bedacht werden, dass erweiterte wirtschaftliche Rahmenbedingungen bis jetzt nicht berücksichtigt werden. Weitere wirtschaftliche Rahmenbedingungen wären bspw. die wirtschaftliche Leistungsfähigkeit von Eigentümern oder Fremdkapitalzinsen. Letzteres sollte aufgrund des bevorzugten Spar- und Investitionszykluses von der entscheidenden Gruppe der Privaten bzw. Selbstnutzer begrenzten Einfluss haben.

Die Szenarienergebnisse in Abschnitt 5.7 zeigen eine deutliche Steigerung der Modernisierungsraten. Dies ist vor allem auf die veränderten Bedingungen⁵⁶ in 2021 und 2022 zurückzuführen.

⁵⁶CO₂-Preis und gestiegene Förderung in 2021; wesentliche Energiekostensteigerungen in 2022.

Die gestiegenen Energiekosten in 2022 zeigen trotz ebenfalls signifikant gestiegener Baukosten den deutlich höheren Einfluss. In keinem der CO_2 -Preisszenarien wird eine Klimaneutralität in 2045 oder 2050 erreicht. Trotzdem bilden die Ergebnisse eine gute Grundlage zur Erreichung der Ziele, da ein Großteil des Bestands zum Ende des Betrachtungszeitraums bereits eine gute Effizienz aufweist. Zum Beispiel sind Altbauten bis 1978 zu mindestens 80 % vollmodernisiert. Damit sind 80 % der Altbauten prinzipiell geeignet für eine Wärmepumpe. Bei Gebäuden neuerer Altersklassen könnten hingegen durch die erhöhte Ausgangseffizienz Wärmepumpen auch ohne eine Vollmodernisierung eingesetzt werden. Die erhöhte Effizienz des Gebäudebestands spiegelt sich auch in den spezifischen Verbrauchswerten wider. In den Szenarien a)-d) werden im Durchschnitt 83,06-85,22 kWh/m²a erreicht. Der spezifische Verbrauch hat sich damit um 37,4-39,0 % reduziert und liegt deutlich über den gesamten Einsparungen (siehe Tabelle 32 27,1-28,9 %). Um basierend auf diesen Szenarien die Klimaschutzziele zu erreichen, müssten Maßnahmen zum gezielten Austausch der verbleibenden fossilen Wärmeversorgungsanlagen eingeführt werden, sofern sich im Vergleich zum Modell kein schnellerer Wechsel der Anlagentechnik abzeichnet.

In Abschnitt 5.8 wird der Einfluss der erneut veränderten Förderbedingungen in 2022 betrachtet. Die Ergebnisse legen nahe, dass durch die Förderanpassung eine deutliche Steigerung der Modernisierungsrate in 2022 unterbunden wird. Es zeigen sich langsam steigende VM-Raten, die im Szenario a) knapp 1,2%/a erreichen und in Szenario b) durch die höheren CO_2 -Preise darüber hinaus geringfügig weiter steigen (vgl. Abbildung 53).

Letztlich lässt sich keine feste Grenze ziehen, ab welchem Punkt der Gebäudebestand keine ausreichende Effizienz für Klimaneutralität aufweist. Dies ist auch davon abhängig, welche Wärmeversorgungstechnologie gewählt wird. Im von der Wissenschaft und Politik favorisierten Fall, dem Einsatz hoher Anteile von Wärmepumpen, ist es jedenfalls notwendig, die Effizienz eines Großteils des Bestands zu steigern. Hierdurch wird gewährleistet, dass Wärmepumpen wirtschaftlich eingesetzt werden können, ohne kostenintensive Investitionen in die Wärmeverteilung im Gebäude zu tätigen und hohe Strombedarfsspitzen im Winter hinnehmen zu müssen. Entsprechend sind die Ergebnisse aus Abschnitt 5.7 mit den Förderkonditionen aus 2021 deutlich attraktiver als Ausgangsbasis zur Erreichung der Klimaneutralität im Wohngebäudebestand.

6 Einfluss zweckgebundener CO_2 -Gebühren und erweiterter Maßnahmen

In Kapitel 5 wird ersichtlich, dass eine Erhöhung des CO_2 -Preises nicht ausreichend sein wird, sofern keine Preise veranschlagt werden, die weit über denen des CO_2 -Preisszenarios b) liegen. Statt den CO_2 -Preis soweit zu steigern, dass eine zielkonforme Entwicklung des Bestands entsteht, könnte die Wirkung des Instruments der CO_2 -Steuer verstärkt werden. Dies kann geschehen, indem die Einnahmen aus dem CO_2 -Preis zweckgebunden werden. Durch die Reinvestition der zweckgebundenen Gebühren in die Modernisierung des Gebäudebestands wird der ökonomische Einfluss des CO_2 -Preises potenziert. Hintergrund ist, dass die Gebühren des gesamten Bestands auf einen kleinen Teil, der modernisiert wird, fokussiert werden. Beispielsweise zahlt im Durchschnitt jeder Haushalt $0,75\text{ €/m}^2$ in 2021. Dies wären bei einem Einfamilienhaus mit 150 m^2 eine Mehrbelastung von $112,5\text{ €}$. Durch eine Reinvestition der Gebühren würde bei einer Vollmodernisierungsrate von ca. $1\%/a$ eine zusätzliche Förderung von 75 €/m^2 (Faktor 100) entstehen. Dies würde entsprechend bei dem Beispiel-Einfamilienhaus 11.250 € bedeuten, was etwa einer zusätzlichen Förderung von 10% bei einem CO_2 -Preis von 25 € bedeuten würde. Hierdurch wird bereits ersichtlich wie groß der ökonomische Effekt sein kann und wie sehr dieser durch steigende CO_2 -Gebühreneinnahmen noch verstärkt werden könnte. Allerdings verringert sich auch der Effekt mit dem Erfolg dieser Maßnahme. Einerseits da jede Modernisierung die zur Reduktion umgesetzt wird entsprechend die zu entrichtenden CO_2 -Gebühren und damit auch die Menge des reinvestierten Geldes verringert. Andererseits verringert sich die geförderte Summe pro Bauvorhaben, wenn mehr Modernisierungen angestoßen werden.

Die in diesem Kapitel vorgestellte Reinvestition stellt ein Umlagesystem dar und ist damit *keine* zusätzliche Förderung. Entsprechend wird damit auch das Argument, dass Förderung nur zur Förderung neuartiger bzw. nicht standardmäßiger Technologien genutzt werden sollte, entkräftet. Die CO_2 -Steuer stellt dabei das Steuerungsinstrument dar, über welches Höhe und Herkunft der Gebühren bestimmt wird. Die Gebühren werden dann zur allgemeinen Verfügung gestellt, dienen aber letztlich denjenigen als Unterstützung, die zuvor eingezahlt haben. Dies kann auch zu einer erhöhten Akzeptanz von Beteiligten führen, da sie zum Teil auf diese Gel-

der wieder zugreifen können. Kombiniert mit einer Verteilung der CO_2 -Steuer auf Mieter und Vermieter verringert sich auch der Anteil derer, die einzahlen aber keinen aktiven Zugriff bzw. Nutzen davon haben. Je nach Einführung der zweckgebundenen Gebühren könnten diese durch einfache Nachweise für die Durchführung von zielführenden Maßnahmen und einen Verteilungsschlüssel an Beantragende ausgezahlt werden. Eine Liste mit zielführenden Maßnahmen sowie ein einfacher Verteilungsschlüssel sind dabei essentiell, um geringe Hürden, möglichst keinen Beratungsaufwand und eine gute Planbarkeit für Modernisierungswillige zu gewährleisten.

Nachfolgend wird untersucht, wie die Zweckbindung sich auf die Modernisierung des Gebäudebestands im Modell auswirkt und ob die CO_2 -Steuer so als zentrales Lenkungsinstrument im Wohngebäudebestand genügt.

6.1 Kalkulation zweckgebundener CO_2 -Gebühren und Integration in das Modell

Für die Berechnung der jährlich anfallenden CO_2 -Einnahmen bzw. Gebührenmenge werden die im Modell bereits hinterlegten Berechnungsmethodiken für die Mengen an CO_2 -Emissionen für Gas, Heizöl, Fernwärme und Kohle mit dem entsprechenden CO_2 -Preis ohne darauf entfallende Umsatzsteuer multipliziert. Zwar entstehen auch bei Biomasse und Strom Emissionen, diese sind allerdings entweder nicht von der Abgabe betroffen oder bereits im Emissionshandel einbezogen. Letzteres trifft auf Strom zu.

Für die Reinvestition wird dabei angenommen, dass die ermittelten Einnahmen gleichmäßig auf die modernisierte Wohnfläche aufgeteilt werden. Die Förderhöhe pro Gebäude im laufenden Jahr wird durch die Einnahmen und modernisierten Gebäude des letzten Jahres bestimmt. Da die zusätzliche Förderung über die Einnahmen und die Modernisierungen des letzten Jahres berechnet werden, wird die zur Verfügung stehende Förderung bei einem Anstieg der Modernisierungen über- und bei einem Rückgang unterschätzt. Dies kann bei deutlichen Sprüngen der Modernisierungsrate oder Einnahmen zu einem Einpendelverhalten führen.

Sollte dies wie im Modell integriert umgesetzt werden, kann es zu einer Unter- oder Überzeichnung des Reinvestitionskontos führen. Deshalb ist seitens des Gesetzgebers zu entschei-

den, ob diese vorher kommunizierte Förderung festgesetzt wird oder sich in Abhängigkeit der Modernisierungen im laufenden Jahr korrigiert. Ersteres würde dem EEG-Umlagesystem ähneln, wo die Einnahmen auf ein Konto eingezahlt werden und im Vorfeld festgelegte Vergütungen/Förderungen ausgezahlt werden. Bei Überzug des Kontos müsste der Bund die Differenz übernehmen oder die Förderung im nächsten Jahr entsprechend reduziert werden. Vorteil dieses Systems wären eine gute finanzielle Planbarkeit der Förderung. Da die Förderung im Modell durch vollmodernisierte Wohnflächenäquivalente umgelegt wird, ergibt sich durch geringere Kosten pro Quadratmeter eine höhere prozentuale Förderung der Mehrfamilienhäuser. Dies kann vor dem Hintergrund des Mieter-Vermieter-Dilemmas als zusätzlicher Anreiz genutzt werden oder angepasst werden. Wird dies nicht angepasst, werden die Mehrfamilienhäuser schneller hohe Vollmodernisierungsanteile erzielen.

In Abbildung 54 sind die sich so ergebenden Einnahmen aus dem CO_2 -Preis für die vier CO_2 -Preisverläufe aus Kapitel 5 dargestellt. Die durchgezogenen Linien stellen die Einnahmen mit den aktuellen Förderbedingungen (ab 2022) dar. Die gepunkteten Linien entsprechen den Verläufen der gleichen Preisszenarien, wenn die Einnahmen als Förderung reinvestiert werden. Zum Vergleich sind ebenso die Einnahmen ohne Zweckbindung für die Förderrahmenbedingungen vor den Anpassungen in 2022 als gestrichelte Linien dargestellt.

Die CO_2 -Einnahmen im Szenario a) linearer Preisanstieg sind nahezu konstant, trotz mehr als einer Verdreifachung des CO_2 -Preises zwischen 2025 und 2050 (>6-fach 2022-2050). Das stark progressive Szenario b) zeigt eine nahezu lineare Steigerung der CO_2 -Einnahmen zwischen 2021 und 2040 von 2,47 Milliarden (2025: 4,5 Mrd.) auf 12,8 Milliarden €. Nach 2040 verlangsamt sich die Steigerung.

Aus der Differenz der gepunkteten Kurven im Vergleich zu den durchgezogenen Kurven (Referenz) kann der Effekt sinkender Emissionen und damit sinkender Einnahmen durch gesteigerte Modernisierungsraten in Folge zusätzlicher Förderung abgelesen werden. Die zweckgebundenen Einnahmenverläufe entsprechen fast den Verläufen mit den Förderbedingungen aus 2021. Hieraus wird ersichtlich, dass die Reinvestitionen ein vergleichbares Volumen wie die entfallene Fördermenge durch Anpassung der Förderung aufweisen. Aus dem Vergleich der Steigerungen können die Auswirkungen auf die THG-Emissionen abgeleitet werden. Mit den Förderbedin-

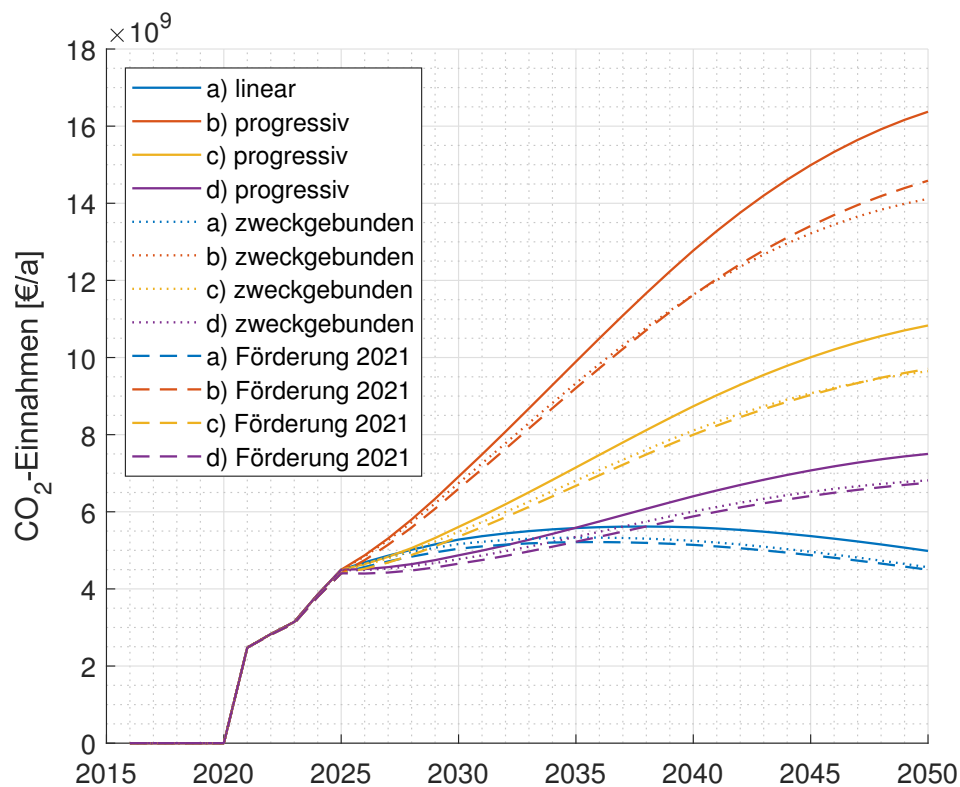


Abbildung 54: Einnahmen aus dem Wohngebäudebestand durch den CO_2 -Preis (ohne USt.) für Förderbedingungen 2022, zweckgebundene Gebühren und Förderbedingungen 2021

gungen aus 2021 ergeben sich bis 2040 marginal höhere Einsparungen. In Szenario b) sinken danach die Einnahmen unter die der Förderbedingungen aus 2021. Dies lässt sich direkt auf die Förderhöhen übertragen. Ab >8-10 Milliarden €/a übersteigen die Reinvestitionen die zusätzlichen staatlichen Förderausgaben bei Beibehaltung der Förderbedingungen aus 2021.

Abbildung 54 verdeutlicht damit bereits, dass bei einer Zweckbindung der CO_2 -Einnahmen keine deutliche Verbesserung der Modernisierungsraten und Einsparungen zu erwarten sind. Durch die Zweckbindung wird stattdessen eine vergleichbare wirtschaftliche Situation wie nach den Energiekostensteigerungen und vor der Förderanpassung 2022 erreicht.

6.2 Einfluss zweckgebundener CO_2 -Gebühren auf die Modernisierungsraten

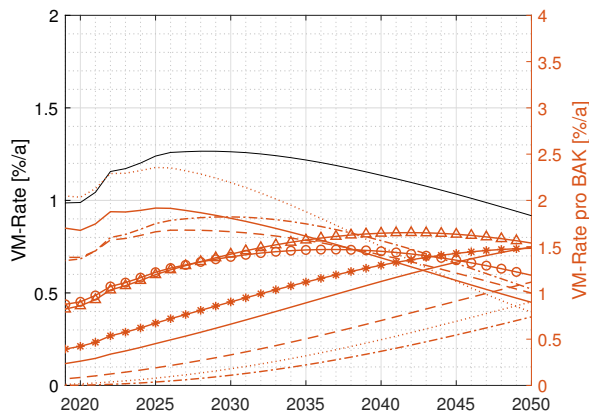
In Abbildung 55 sind die Vollmodernisierungsraten der in Kapitel 5 eingeführten CO_2 -Preisverläufe (vgl. Abbildung 45 & Abbildung 54) bei Reinvestition in den Wohngebäudebestand dargestellt. Die Reinvestition geschieht, wie im vorherigen Abschnitt erläutert, gleichmäßig aufgeteilt auf die vollmodernisierten Wohnflächenäquivalente.

Die Modernisierungsraten steigen durch die Reinvestition in 2022 von 1,10 %/a (vgl. Abbildung 53) auf 1,16 %/a. Damit erreichen sie vorerst nicht das Niveau vor Anpassung der Förderbedingungen, da der CO_2 -Preis in 2022 noch sehr gering ist. Mit steigendem CO_2 -Preis vergrößert sich aber im weiteren Verlauf auch der Einfluss der Reinvestitionen auf die Modernisierungsraten.

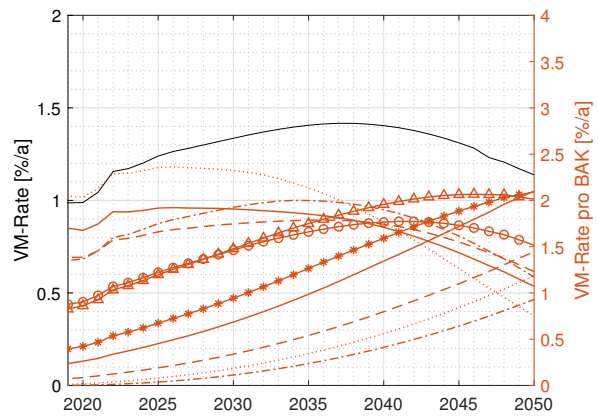
Die unterschiedlichen CO_2 -Preisverläufe führen für die Jahre bis einschließlich 2026 zu gleichen Resultaten, da der CO_2 -Preis bis 2025 bereits festgelegt und damit in allen vier Szenarien identisch ist. Daraus resultiert auch eine identische Reinvestitionshöhe im jeweiligen Folgejahr bis einschließlich 2026.

Zusammenfassend wird durch die Einführung der CO_2 -Steuer, die neuen ökonomischen Rahmenbedingungen in Folge des Ukraine-Krieges und die Nachwirkungen der Pandemie sowie die Einführung einer Reinvestition der CO_2 -Gebühreneinnahmen eine Erhöhung der Modernisierungsrate um 20-30 % im Modell bis 2026 erzielt. Ein weitere Steigerung der Modernisierungsraten ist nur bei schnell steigenden CO_2 -Preisen in Szenario b) zu sehen.

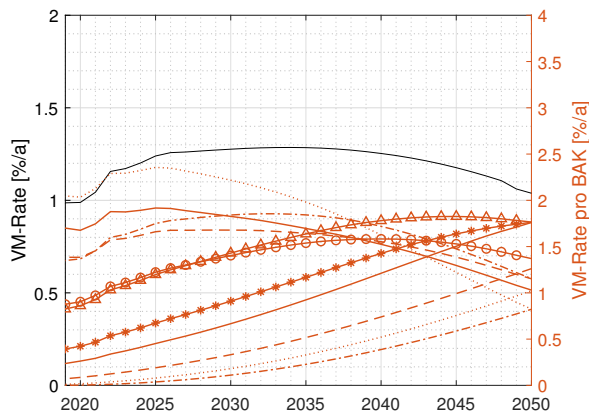
Die Modernisierungsraten aus Kapitel 5 ohne Reinvestition und die Modernisierungsraten bei Reinvestition zeigen deutlich, dass mit steigenden Modernisierungsraten die notwendigen wirtschaftlichen Rahmenbedingungen zu dem Aufrechterhalten dieser Raten im Modell stetig steigen. Die Resultate der Kapitel 5 und 6 untermauern damit die Ergebnisse von Kapitel 4, wo im Modell zwar keine wirtschaftlichen Rahmenbedingungen hinterlegt waren, die erhöhten Aufwendungen aber ebenso durch fallende Modernisierungsraten ersichtlich sind. Dies ist in Kapitel 4 hauptsächlich auf den Sanierungszyklus zurückzuführen, der bei erhöhten Modernisierungsraten, im Vergleich zum Sanierungszyklus, zu vorgezogenen Modernisierungen führt, die abhängig



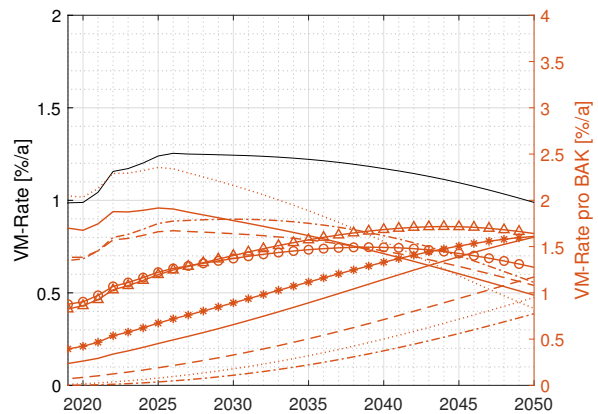
(a) Lineare Entwicklung CO_2 -Steuer



(b) Progressive Entwicklung CO_2 -Steuer



(c) Progressive Entwicklung CO_2 -Steuer



(d) Progressive Entwicklung CO_2 -Steuer



Abbildung 55: Vollmodernisierungsraten insgesamt und per BAK in Abhängigkeit der Wirtschaftlichkeit bei Anwendung der zweckgebundenen CO_2 -Gebühren; die VM-Raten beziehen sich jeweils auf die Gesamtmenge der BAK bzw. den gesamten Wohngebäudebestand inklusive Neubau.

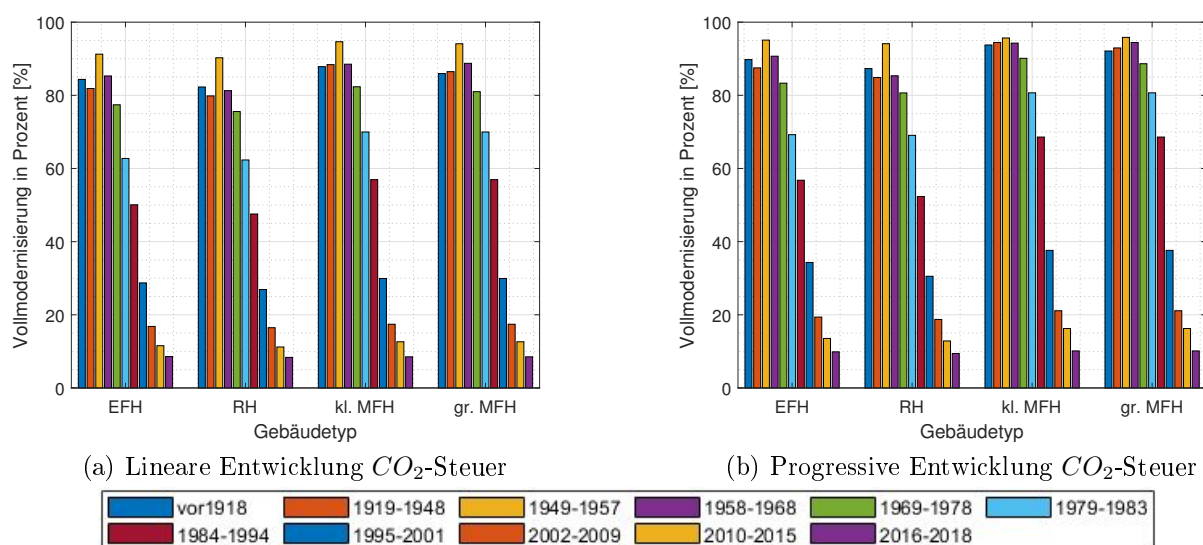


Abbildung 56: Vollmodernisierungsanteile der Baualtersklassen bei Reinvestition in 2050

von der zeitlichen Entfernung zum Sanierungszyklus entsprechend incentiviert werden müssen. Mit dem Einbezug der wirtschaftlichen Rahmenbedingungen bei Modernisierung ergeben sich durch sinkende Energieeinsparpotenziale zusätzliche Nachteile, die nur aufgehoben werden können, wenn die Energiepreise im gleichen Maße steigen wie das Einsparpotenzial sinkt.

In Abbildung 56 sind die Vollmodernisierungsanteile der Szenarien a) und b) dargestellt. Die Modernisierungsanteile ähneln den Ergebnissen in Abbildung 49 ohne Reinvestition. Damit gelingt es, die Vollmodernisierungsanteile in 2050 zu steigern, allerdings nicht soweit, dass auch die neueren Baualtersklassen zum Großteil vollmodernisiert sind.

In Abbildung 57 sind analog zu Kapitel 5 die THG-Verläufe der Szenarien a) und b) mit Reinvestition der CO_2 -Steuer dargestellt. Die Klimaschutzziele werden nicht erreicht, da in 2045 und 2050 weiterhin nicht unerhebliche THG-Emissionen entstehen. Wie bereits in Kapitel 4 verhindern neben den Restemissionen durch Strom und Fernwärme in Szenario b) vor allem die verbleibenden Gasmengen das Erreichen der Ziele. Da sich eine weitere Erhöhung der Modernisierungsrate als sehr schwierig darstellt, stellt sich die Frage, wie die Klimaschutzziele erreicht und die restlichen Emissionen aus dem Bestand entfernt werden können.

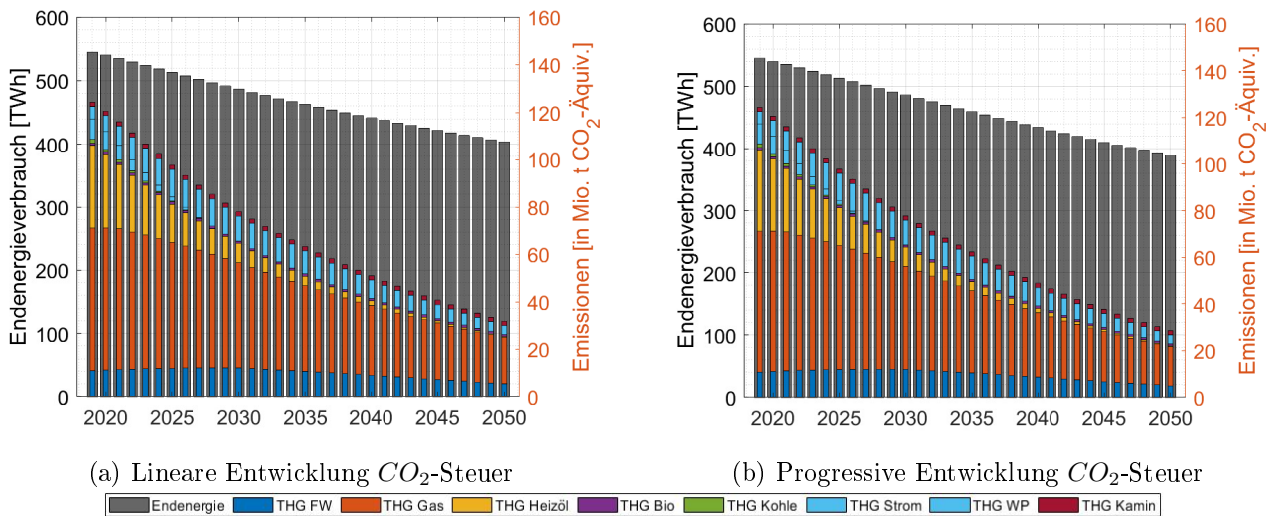


Abbildung 57: Endenergie und THG-Verlauf bei Reinvestition 2019-2050

Gelingt es nicht, die Effizienz weiter zu steigern, so müssen einerseits die verbleibenden Emissionen im Strom und der Fernwärme schneller reduziert werden und daneben ein schnellerer Austausch der im System verbleibenden Gasanlagen erreicht werden. Hierdurch ist auch ein Erreichen der Ziele im Jahr 2045 denkbar.

6.3 Ergänzende Maßnahmen zur beschleunigten Zielerreichung in 2045

Da die bereits betrachteten Maßnahmen im Modell nicht zur Zielerreichung im Wohngebäude-sektor führen, werden im Folgenden aufeinander aufbauende ergänzende Maßnahmen vorgestellt und in das Modell integriert. Für die Zielerreichung wird explizit das neue Zieljahr 2045 für Klimaneutralität betrachtet. Als zielkonformes Mindestziel wird eine Reduktion um 95 % im Vergleich zu 1990 (184-201 Mio. t/a CO_2 -Äquiv. [82]) angenommen. D.h. bei Unterschreiten von max. 10,05 Mio. t/a CO_2 -Äquiv. werden die Klimaziele im Wohngebäudebestand als erreicht angesehen. Damit von tatsächlicher Klimaneutralität gesprochen werden kann, müssen allerdings auch die Restemissionen kompensiert werden. Entsprechend ist das Erreichen möglichst geringer Restemissionen auch über das Mindestziel hinaus vorteilhaft. Die Kompensation der Restemissionen kann durch CO_2 -Senken⁵⁷ erreicht werden. Je geringer die verbleibenden Emissionen, um so geringer die notwendigen Anstrengungen für CO_2 -Senken. Ausgangsbasis für die Bewertung der ergänzenden Maßnahmen ist Szenario b) mit zweckgebundenen CO_2 -Gebühren.

⁵⁷Z.B. natürliche Senken wie Wälder oder technische wie Carbon Capture.

1. ergänzende Maßnahme: Reduzierte Emissionsfaktoren Strom & Fernwärme

Diese Maßnahme wird bereits in Abschnitt 4.4 genutzt, um die Zielerreichung für das Zieljahr 2050 mit exogen erhöhter Modernisierungsrate zu erreichen. Hintergrund ist, dass die prognostizierten Emissionsfaktoren für 2050 recht hoch sind und damit eine 95 %ige THG-Einsparung ohne drastische Endenergieeinsparungen sehr erschweren. Wird 2045 betrachtet, haben die Emissionsfaktoren noch nicht einmal das prognostizierte Endniveau von 2050 erreicht und sind entsprechend noch höher. Die Realisierung kann durch die beschleunigte Reduzierung der Emissionen für die Bereitstellung von Strom und Fernwärme gelingen. Dies und weitere Anstrengungen bei der Bereitstellung sind theoretisch sowieso notwendig, um die Klimaneutralität auch anderer Sektoren und der Energiewirtschaft bis 2045 zu gewährleisten.

Für die Integration der Maßnahme wird angenommen, dass die Emissionsfaktoren bereits 2045 auf das Niveau von 2050 sinken und sich danach bis 2050 auf den bereits in Abschnitt 4.4 genutzten Wert ($\frac{1}{3}$ *Wert 2050) linear reduzieren.

Die Emissionen in 2045 reduzieren sich von 37,71 auf 31,15 Millionen Tonnen (-17,4 %, vgl. Tabelle 34). Von den verbleibenden Emissionen in 2045 sind 69 % auf Gas zurückzuführen.

2. ergänzende Maßnahme: Verbot für Gas ab 2026 bei Modernisierung

Ab 2026 wird ein Gasverbot eingeführt, welches den Einbau von Gasanlagen bei Modernisierung des Gebäudes oder im Neubau unterbindet. Für den weitaus regelmäßigeren Fall des reinen Ersatzes von Altanlagen ohne Maßnahmen an der Gebäudehülle werden Ausnahmen vor dem Hintergrund der zeitlichen Dringlichkeit bei Ausfall (Havarie) angenommen.

Die THG-Emissionen in 2045 reduzieren sich geringfügig von 31,15 auf 28,43 Millionen Tonnen (-24,6 % vgl. mit Ausgangsszenario). Der Effekt der Maßnahme ist vergleichsweise gering, da sich bereits zuvor bei Modernisierung und im Neubau fast ausschließlich für Wärmepumpe (vgl. Abbildung 47) und die konstant verankerten Mengen von Biomasse und Fernwärme entschieden wird. Von den verbleibenden Emissionen ist mit 66 % weiterhin der Großteil auf Gas zurückzuführen.

Aufgrund der Schwierigkeit Ausnahmen zu kontrollieren und der sowieso geringen zusätzlichen Einsparungen, ist die Einführung der Maßnahme 2 ohne Maßnahme 3 als wenig praktikabel und auch nicht zielführend anzusehen.

3. ergänzende Maßnahme: Verbot für Gas ab 2026 bei Modernisierung und reiner Instandsetzung (laufende Anlagen müssen nicht demontiert werden)

Als nächster Schritt werden die vorherigen Ausnahmen für den Ersatz von Altanlagen entfernt. Hierfür sollte die Maßnahme frühzeitig kommuniziert werden, damit sich etwaige Anlageneigentümer darauf vorbereiten können. Daneben sollten auch für Anlagenausfälle kurzfristige Lösungsmöglichkeiten gefunden werden. Für die Integration in das Modell wird davon ausgegangen, dass 4 % des Bestandes an Gasanlagen, der 2025 besteht, jährlich ausgetauscht wird. Die Annahme basiert auf den typischen Modernisierungsraten (ca. 3%/a siehe [36] und Abschnitt 2.3) für Heizungsanlagen plus einem Aufschlag für ein erhöhtes Durchschnittsalter.

Mit dieser Maßnahme werden bis 2050 alle Gasanlagen demontiert. In 2045 verbleiben allerdings weiterhin Gasanlagen, die 34 % der Restemissionen ausmachen. Die THG-Emissionen reduzieren sich auf 17,46 Millionen Tonnen (-53,7 % vgl. mit Ausgangsszenario). Interessanterweise steigen bei dieser Maßnahme die Restemissionen für Heizöl (vgl. Maßnahme 3 Tabelle 34). Da aufgrund schnellerer Emissionsreduktionen die CO_2 -Gebühren niedriger ausfallen, sinkt auch die Reinvestition in den Gebäudebestand und damit die Modernisierungsrate.

Mit Maßnahme 3 ist die Zielerreichung in 2045 in greifbare Nähe gerückt. An diesem Punkt gibt es mehrere realistische Möglichkeiten die Restemissionen so weit zu reduzieren, dass sie einem nahezu klimaneutralen Wohngebäudebestand entsprechen. Die Restemissionen für Strom und Fernwärme können durch weitere Anstrengungen in Maßnahme 1 reduziert bzw. auch gänzlich eliminiert werden. Restemissionen bei der Biomasse können durch eine Reduktion der Emissionen im Herstellungs- und Bereitstellungsprozess (Waldarbeiten, Transport & Verarbeitung) ebenfalls reduziert oder eliminiert werden.

Für die Energieträger, die aufgrund ihres Emissionsfußabdrucks eher unerwünscht sind (Heizöl & Gas), gibt es zwei naheliegende Lösungsmöglichkeiten:

1. Substitution durch andere Wärmeversorgungsanlagen
2. Substitution des Energieträgers

Da vergleichsweise wenige Anlagen in 2045 und kurz davor noch Heizöl oder Gas⁵⁸ nutzen, ist eine Substitution mit vertretbaren Mengen durch Biogas⁵⁹, Wasserstoffderivate oder ähnlichem denkbar. Zudem ist bei sinkenden Absatzmengen für Erdgas damit zu rechnen, dass das Gasnetz für andere Energieträger genutzt wird. Damit wäre eine Substitution des Energieträgers auch vergleichsweise einfach, sofern dieser kompatibel mit Gasanlagen ist. Wird das Gasnetz nicht für andere Energieträger genutzt, muss damit gerechnet werden, dass die Unterhaltskosten kleine Gasmengen deutlich teurer machen. Entsprechend ist es notwendig den Energieträger im Erdgasnetz zu wechseln oder ab einem gewissen Punkt Teilbereiche des Gasnetzes stillzulegen und etwaige Restanlagen zu demontieren. Da das Gasnetz als solches aber eine wertvolle Infrastruktur ist, ist eine weitere Nutzung mit geänderten Energieträger attraktiv.

Ein größerer Einsatz solcher Substitute ist theoretisch auch denkbar, so dass weniger Umstellungen auf Wärmepumpen notwendig wären. Dies würde aber auch zu deutlich höheren Importen (z.B. Wasserstoff) führen. Hierfür ist noch nicht absehbar in welcher Größenordnung diese zur Verfügung stehen werden und welcher Preis bei großen Mengen letztlich aufgerufen wird. Daneben sind auch eine hohe Nachfrage von anderen Sektoren wie Industrie und Schwerlastverkehr zu erwarten, so dass in Kombination mit der Importabhängigkeit diese Lösung mit wachsendem Umfang zusehends als kritisch angesehen werden muss. Variante 1 „Substitution durch andere Wärmeversorgungsanlagen“ wird mit Maßnahme 4 vorgestellt.

⁵⁸In 2045 verbleiben im Modell mit der 3. ergänzenden Maßnahme in Summe 28,55 TWh Gas & Heizöl.

⁵⁹In 2020 wurden von 228 Anlagen 9,85 TWh Biomethan in Deutschland erzeugt [46]. Die Gesamtanzahl der Biogasanlagen beträgt ca. 9.600 Anlagen. Die meisten Anlagen werden allerdings für eine direkte Verstromung mit teilweiser Wärmeauskopplung für Nahwärmenetze genutzt [38].

4. ergänzende Maßnahme: Verbot für Gas ab 2026 bei Modernisierung und reiner Instandsetzung + laufende Anlagen mit fossilen Energieträgern müssen bis spätestens 2045 demontiert werden

Maßnahme 4 ist mit der Pflicht auch bestehende Anlagen zu demontieren vergleichsweise harsch. Wird diese Maßnahme aber mit 20 Jahren Vorlauf kommuniziert und sind die wirtschaftlichen Rahmenbedingungen bis dorthin günstig für einen Umstieg, werden wahrscheinlich die meisten Anlagenbesitzer bereits weit im Voraus aufgrund der wirtschaftlichen Rahmenbedingungen wechseln. Dies geschieht ebenfalls bereits im Modell. Die Maßnahme zielt damit nur auf verbleibende Restbestände ab. Daneben ermöglicht der Zeitraum bis 2045 ineffiziente Gebäude zu dämmen und ggf. auch neue Technologien als marktreife Alternativlösung zu nutzen.

Im Modell greift die Maßnahme erst aktiv ab 2040. Ab 2040 wird angenommen, dass 20 % der bestehenden fossilen Restanlagen pro Jahr demontiert werden. Stattdessen werden die Anteile von Fernwärme, Biomasse und Wärmepumpen erhöht. Die Umstellung könnte auch auf etwaige neue Technologien geschehen, kann aber zum derzeitigen Stand nicht berücksichtigt werden.

Hierdurch sind 2045 alle Emissionen aus Gas und Heizöl verschwunden. Stattdessen steigen aber die Emissionen durch Fernwärme, Biomasse und Wärmepumpen. In Summe sinken die Emissionen auf 11,31 Millionen Tonnen (-70,0 % vgl. mit Ausgangsszenario) in 2045. Selbst mit dieser Maßnahme werden also die Ziele für 2045 ohne weitere Anpassung an Fernwärme, Biomasse und Strom nicht erreicht.

5. ergänzende Maßnahme: Reduktion Emissionsfaktor Biomasse

Als letzte ergänzende Maßnahme wird eine Reduktion des Emissionsfaktors für Biomasse integriert, da für diese Maßnahme wahrscheinlich keine aktive Gesetzgebung notwendig ist. Im Emissionsfaktor für Biomasse, so wie dieser im Modell genutzt wird, sind Emissionen aus der Vorkette aber keine aus der Verbrennung enthalten. Die Verbrennung wird nicht berücksichtigt, da von einer nachhaltigen Nutzung von Biomasse ausgegangen wird. Die verbleibenden Emissionen für Biomasse im Modell können entsprechend durch Verbesserungen an der Vorkette reduziert werden. Wird für die Bereitstellung von Holz für den Kamin/Ofen sowie Pellets und Hackschnitzeln für Wärmeversorgungsanlagen vermehrt auf elektrische Maschinen und auch

einen elektrischen oder vergleichbaren klimafreundlichen Transport gesetzt, kann eine entsprechende Reduktion herbeigeführt werden. Es wird als sehr wahrscheinlich angesehen, dass dies ohne aktive Beeinflussung bis 2045 geschieht.

Für die Integration wird angenommen, dass sich der Emissionsfaktor halbiert. Durch die Halbierung der Emissionen der Biomasse werden die Mindestzielgrenze von 10,05 Millionen Tonnen mit 9,76 Millionen Tonnen bereits 2045 unterschritten und so die derzeitigen Klimaschutzziele im Wohngebäudebestand erreicht.

Tabelle 34: Vergleich der THG-Emissionen ergänzender Maßnahmen in 2045 & 2050; Szenarien die eine 95 %ige Reduktion ggü. 1990 erreichen sind **markiert**.

CO ₂ -Äquiv.	2045						2050	Einheit
	FW	Gas	Heizöl	Biomasse	WP	gesamt	gesamt	
Maßnahme 1	3,5	21,5	0,9	2,7	2,6	31,15	22,89	Mio. t/a
Maßnahme 2	3,4	18,7	0,9	2,7	2,7	28,43	20,37	Mio. t/a
Maßnahme 3	4,2	5,9	1,2	2,8	3,2	17,46	8,21	Mio. t/a
Maßnahme 4	4,8	0,0	0,0	3,1	3,4	11,31	6,98	Mio. t/a
Maßnahme 5	4,8	0,0	0,0	1,6	3,4	9,76	5,43	Mio. t/a

In Abbildung 58 ist der Emissionsverlauf bei Umsetzung aller fünf ergänzenden Maßnahmen auf Basis des Szenario b) mit zweckgebundenen CO₂-Gebühren dargestellt. Durch die Umsetzung der ergänzenden Maßnahmen kann die anfängliche Reduktionsgeschwindigkeit aus dem Szenario b) auch über die Jahre 2030 hinaus beibehalten werden und es entsteht eine nahezu lineare Reduktion der Emissionen zwischen 2020 und 2045.

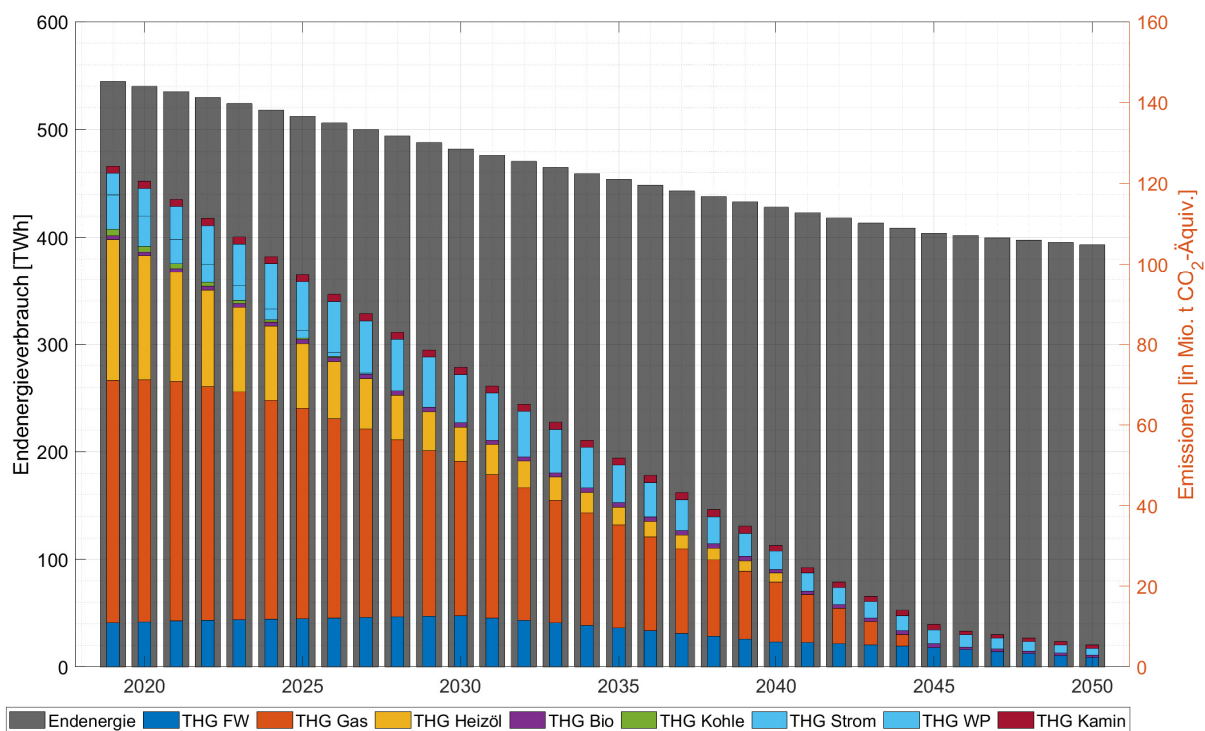


Abbildung 58: Endenergie und THG-Verlauf in zielkonformen Szenario mit ergänzenden Maßnahmen

6.4 Schlussfolgerungen

Die Reinvestition der CO_2 -Einnahmen, die sich für die vier CO_2 -Preisszenarien ergeben, können in allen vier Szenarien die Modernisierungsrate deutlich steigern. Im Preisszenario b) werden auch die Einsparungen der Szenarien mit Förderrahmenbedingungen vor der Anpassung in 2022 erreicht. Dadurch sind die Auswirkungen vergleichbar mit einer Wiedereinführung der Förderrahmenbedingung vor Anpassung in 2022. Allerdings wird die Effizienz der Maßnahme durch hohe Mitnahmeeffekte begrenzt, da die bereits zuvor Modernisierungswilligen ebenfalls von erhöhten Reinvestitionen profitieren aber keine weitere Modernisierung auslösen. Beispielsweise steigen die Modernisierungsraten mit alten Förderbedingungen (ca. +25 %-Prozentpunkte höherer Förderzuschuss) von 1,1 auf 1,3 %/a. Damit löst die höhere Förderung bei mehr als einer Verdopplung der Förderausgaben eine 18 % höhere Modernisierungsrate aus. Ein Großteil der Förderung fließt dabei in Gebäude, die auch ohne zusätzliche Förderung modernisiert worden wären⁶⁰. Um den Mitnahmeeffekt zu reduzieren, könnten stattdessen Fördererhöhungen gezielt

⁶⁰Siehe auch Steinbach 2015 in Abschnitt 2.4.2 & [113].

für Bauteile mit geringer Modernisierungsrate eingesetzt werden. So werden durch eine geringe Ausgangszahl von Modernisierungen die Förderungen stärker auf zusätzliche Modernisierungen konzentriert.

Die entwickelte Modellmethodik führt dazu, dass Restbestände nur schwierig eliminiert werden können. Einerseits fallen die Modernisierungsraten deutlich, wenn die Anzahl der potenziellen Gebäude sinkt. Andererseits sind keine direkten Austauschraten für den Wechsel von Gasanlagen auf Wärmepumpen ohne Modernisierung im Modell implementiert. Dies ist aber mit voranschreitendem Betrachtungszeitraum durchaus denkbar, da die Ausgangsenergieeffizienz steigt. Besteht eine gute Ausgangseffizienz (jüngere Gebäude) und ist auch die Wärmeverteilung im Ausgangszustand für niedrige Vorlauftemperaturen nutzbar, kann die Wärmepumpe auch ohne Modernisierung wirtschaftlich genutzt werden. Der Gedanke, dass Wärmepumpen nur im Neubau oder modernisierten Altbauten wirtschaftlich genutzt werden können, beinhaltet bereits ein relatives Preisniveau⁶¹ für Strom verglichen mit anderen Energieträgern. Vorteilhafte relative Preise der Energieträger können damit in einer deutlichen Verschiebung der in etwa notwendigen Jahresarbeitszahl für einen wirtschaftlichen Wechsel auf Wärmepumpen resultieren. Damit werden auch höhere Vorlauftemperaturen wirtschaftlich denkbar, vorausgesetzt die technischen Rahmenbedingungen können eingehalten werden (z.B. notwendige Vorlauftemperatur $<$ max. Temperatur Wärmepumpe).

Eine substanzielle und anhaltende Erhöhung der Modernisierungsrate wird auch in Preisszenario b) mit der schnellsten Preissteigerung bei Reinvestition im Modell nicht erreicht. Daraus ergibt sich die Notwendigkeit weitere Maßnahmen einzuführen oder die wirtschaftlichen Rahmenbedingungen weiter zu verbessern (allgemein oder z.B. durch den Fokus auf derzeit wirtschaftlich problematische Maßnahmen mit hohem Potenzial). Die Einführung erweiterter Maßnahmen scheint hierbei realistischer als die allgemeine Verbesserung der wirtschaftlichen Rahmenbedingungen über das Preisszenario b) mit Reinvestition hinaus. Ein Fokus auf problematische Maßnahmen auf Bauteilebene ist ebenfalls vielversprechend, kann derzeit allerdings nicht durch die Modellstruktur abgebildet werden.

Die in Abschnitt 6.3 eingeführten erweiterten Maßnahmen führen erstmals zum Erreichen der

⁶¹Preisniveau Strom für Wärmepumpen im Vergleich zum Preisniveau Ausgangsenergeträger.

langfristigen Klimaschutzziele (2045 & 2050) im Wohngebäudebestand. Kurzfristige Ziele (z.B. für 2030) können durch zeitliche Verlagerung der Anstrengungen ebenfalls erreicht werden. Hierbei sollte bedacht werden, dass vielen anfänglichen Einsparungen aufgrund der Tatsache, dass vor allem alte Gebäude mit hohem Potenzial für Energieeffizienzsteigerungen derzeit sanierungsbedürftig sind, eine Modernisierung der thermischen Gebäudehülle vorausgeht. Dadurch werden deutliche kurzfristige Steigerungen der Anstrengungen in diesem Bereich durch hohe Kosten und den Personalaufwand begrenzt. Daraus lässt sich schließen, dass vor allem für die kurzfristigen Ziele frühzeitig die richtigen Rahmenbedingungen gestellt werden und diese sofern notwendig auch schnell angepasst werden sollten.

Bewertung der Maßnahmen zur Zielerreichung:

Die Summe der notwendigen Maßnahmen für die Zielerreichung und deren teilweise drastischen Auswirkungen, lassen die Zielerreichung mit den Maßnahmen anfänglich eher unrealistisch erscheinen. Deshalb werden die Maßnahmen und das Ausgangsszenario Preisszenario b) mit Reinvestition im Folgenden näher betrachtet.

- **Ausgangsszenario - Preisszenario b) mit Reinvestition:**

Eine grundlegend erhöhte Modernisierungsrate wird als notwendig betrachtet. Dies kann wie in Kapitel 6 entweder durch die Einführung von zweckgebundenen CO_2 -Gebühren oder auch durch die Anpassung der Förderung gelingen. Die bereitgestellten Mittel hierfür (vgl. 13-14 Mrd. € für 2022 & 8 Mrd. € 2021 [29] mit Abbildung 54) könnten bereits ausreichend oder nahezu ausreichend sein⁶². Aus der deutlichen Steigerung der Sanierungsförderung in 2022 bis einschließlich Juli im Vergleich zu 2021 kann abgeleitet werden, dass neben den höheren Zuschüssen auch mehr Förderanträge und damit wahrscheinlich auch eine Steigerung der Modernisierungsrate einherging, die durch hohe Förderzuschüsse in Verbindung mit den wirtschaftlichen Rahmenbedingungen ausgelöst wurde. Werden die bereitgestellten Mittel mit denen im Ausgangsszenario verglichen, zeigt sich eine vergleichbare Höhe. Allerdings ist fraglich, inwiefern diese Mittel in 2023 noch bei den derzeitigen Förderhöhen ausgeschöpft werden. Insofern ist aber ein kurzfristiges Erreichen der Ergebnisse aus dem Ausgangsszenario nicht unrealistisch. Auf längere Sicht ergeben sich

⁶²„Mit der Reform der BEG werden jährliche Bewilligungen von 13-14 Milliarden Euro möglich bleiben, davon etwa 12-13 Milliarden Euro für Sanierungen. Zum Vergleich: 2021 wurden rund 8 Mrd. Euro und 2020 rund 5 Milliarden Euro für die Sanierung ausgegeben. In 2022 sind es aktuell für die Sanierungsförderung rund 9,6 Milliarden Euro im Zeitraum von Januar bis Juli 2022.“[29]

in Preisszenario b) allerdings durch hohe CO_2 -Preise und sich daraus ergebenden steigenden Reinvestitionen höhere Modernisierungsraten. Um vergleichbare wirtschaftliche Rahmenbedingungen zu generieren, müssten entsprechend ähnlich hohe CO_2 -Preise und gute Fördermodalitäten oder eine Variation hiervon geschaffen werden.

Die erforderliche Einführung eines schnell steigenden CO_2 -Preises wie in Szenario b) und steigende Förderausgaben werden damit als größte Hürden für die Erreichung der Ergebnisse des Ausgangsszenarios angesehen. Hinderlich für schnelle CO_2 -Preisanpassungen sind dabei auch die unterschiedlichen Auswirkungen der CO_2 -Preise auf einzelne Sektoren. Um einerseits substantielle Lenkungswirkung im Gebäudebereich durch den CO_2 -Preis zu erreichen und andererseits erschwingliche Mobilität zu gewährleisten, sind ggf. unterschiedliche Preise für das Erzielen der gewünschten Wirkungen notwendig. Die Zweckbindung der CO_2 -Gebühren ist hierzu nicht notwendig, koppelt aber Preis und Förderung und kann damit als zentrales Steuerungsinstrument genutzt werden.

- **Maßnahme 1 & 5:**

Die Maßnahmen 1 & 5 werden als realistische Annahmen angesehen, die sich aus Zielen in anderen Sektoren (Energie- sowie Forstwirtschaft & Mobilität) ergeben. Nur bei nicht zielkonformer Entwicklung wäre ein aktives Gegensteuern notwendig.

- **Maßnahme 2, 3 & 4:**

Maßnahmen 2, 3 & 4 sind gesteigerte Formen eines gesetzlichen Verbotes von Gasanlagen. Während diese aufgrund der Modellstruktur naheliegend für die Zielerreichung waren, ist es denkbar, dass diese Maßnahmen zur Beseitigung von Restbeständen fossiler Anlagen real gar nicht notwendig werden. Dies kann vor dem Hintergrund, dass eine gesetzliche Verabschiedung sicherlich auch nicht ohne weiteres möglich wäre, auch als Notfallmaßnahme für nicht zielkonforme Entwicklungen kommuniziert werden. Aufgrund der Gegenwehr sollten einerseits die unterschiedlichen Härtegrade der Maßnahme genutzt werden, frühzeitig eine Einführung diskutiert werden und ebenso durch die richtigen wirtschaftlichen Rahmenbedingungen dafür gesorgt werden, dass dieses Verbot kaum notwendig ist bzw. nur geringe Restbestände betrifft. Allein die Diskussion über die Einführung eines Verbotes könnte dabei sogar Eigentümer überzeugen, sich für eine Alternative zu entscheiden.

Durch das Ausgangsszenario in Kombination mit den erweiterten Maßnahmen werden von jedem Bereich der Wärmeversorgung des Wohngebäudebestands Beiträge erwartet. Die größten nicht genutzten Potenziale zur Reduktion der THG-Emissionen verbleiben nach Umsetzung der ergänzenden Maßnahmen im Modell in 2045 bei der Fernwärme.

7 Ergebnisse und Ausblick

Abschnitt 7.1 geht auf die zentralen Ergebnisse der Arbeit ein und fasst damit auch die Antworten auf die acht Forschungsfragen zusammen. In Abschnitt 7.2 werden die Limitationen des Modells und der Arbeit aufbereitet, die wiederum Ansatzpunkte für weiterführende Forschungsarbeiten liefern. Abschließend wird in Abschnitt 7.3 ein Ausblick gegeben.

7.1 Beantwortung der Forschungsfragen & Schlussfolgerungen

In Kapitel 3 werden, aufbauend auf den in Kapitel 2 gegebenen Grundlagen, den Untersuchungen vergangener Entwicklungen und Prognosen wichtiger Parameter, Formeln für ein Wohngebäudebestandsmodell entwickelt. Eines der zentralen Ergebnisse dieser Entwicklung ist die Gleichung 15 zur Bestimmung der Modernisierungsrate. Zentrales Element in Gleichung 15 ist das Kopplungsprinzip (Verbindung von Sanierung mit Modernisierung), welches in der Literatur als wichtiges Kriterium für eine wirtschaftliche Umsetzung von Maßnahmen angesehen wird. Dies deckt sich auch mit den Ergebnissen der wirtschaftlichen Untersuchung von Modernisierungen (Punkt 5.1.4). Das Kopplungsprinzip ist durch den Sanierungs- ($sanf_{i,j}(n)$) und Ökonomiefaktor ($ecof_{i,j}(n)$) in Gleichung 15 integriert.

Besonderheiten bei der Nutzung von VM:

Gleichung 15 könnte auch auf Bauteilebene angewendet werden. In dieser Arbeit wurde sich zu Beginn des Modellierungsprozesses allerdings dazu entschlossen VM zu nutzen, da keine thermischen Informationen zu Teilmodernisierungen durch TABULA abgedeckt werden und so ein Vielfaches an weiteren Varianten hätte thermisch wie auch wirtschaftlich im Modell abgebildet werden müssen.

Nicht alle Bauteile haben einen typischen Sanierungszyklus. Die Kellerdecke und die Fassade sind Ausnahmen, da sie zwar sanierungsbedürftig sein können, aber selbst in diesem Zustand die Funktionstüchtigkeit meist nicht eingeschränkt ist. Sind Fenster oder Dach hingegen undicht, können weitere Schäden entstehen, wenn diese nicht behoben werden. Entsprechend wäre der Sanierungsdruck auch anders zu bewerten. Damit ist es nicht überraschend, dass Kellerdecke und Außenfassade die Bauteile mit den geringsten Modernisierungsraten sind (vgl. Tabelle 13).

Dies kann neben dem Sanierungsdruck aber auch auf die hohen Kosten der Fassadendämmung sowie Probleme⁶³ bei Maßnahmenumsetzung zurückgeführt werden. Daneben besitzen die Bauteile und ihre Ausführungsarten sehr unterschiedliche Lebensdauern.

Die Nutzung der VM ist entsprechend eine Abstraktion, die ein komplexes Zusammenspiel einer Vielzahl von individuellen Gegebenheiten (Gebäudeart, Gebäudetyp, Gebäudealter, Bauteilart, Ausführungsarten der Bauteile, Ausnahmen, ...) komprimiert. Zwar verhalten sich die einzelnen Bauteile hinsichtlich ihres Sanierungsdrucks unterschiedlich, die Außenwand bzw. -fassade sticht hierbei aber hervor, da sie einerseits einem geringen Sanierungsdruck unterliegt und auch die höchste Lebensdauer hat. Damit ist die Außenwand in Kombination mit dem hohen Energieeinsparpotenzial zentral für die Modernisierung eines Gebäudes. Entsprechend wird für die Simulation mit VM für die Lebensdauer in Gleichung 15 die Außenwand als Referenz genommen.

Untersuchung des derzeitigen Trends im Modell:

Der derzeitige Trend wird mit dem entwickelten und kalibrierten Modell in drei Betrachtungen untersucht. Als erstes wird in Abschnitt 4.1 der derzeitige **Trend bei konstantem Ökonomiefaktor** genutzt. D.h. die wirtschaftlichen Rahmenbedingungen zu Beginn der Betrachtung werden für den Betrachtungszeitraum eingefroren. Hierfür wird auch der Einfluss des Neubaus betrachtet, welcher im Trendszenario in 2050 nur für 4,1% der THG-Emissionen verantwortlich ist. Verglichen mit dem Wohnraum den der Neubau (19,4% bezogen auf die Gesamtwohnfläche in 2050) bietet, ist er damit zumindest im Betrieb wenig problematisch. Daneben sind aber auch zusätzliche Flächenverbräuche, die graue Energie und ein höherer Endenergiebedarf (10,8 % des Energiebedarfs in 2050 bezogen auf Bilanzgrenze Wärmeerzeuger) zu berücksichtigen. Letzteres führt zu einem entsprechenden Mehrbedarf an Erneuerbaren, der bei geringen Wohnflächenverbräuchen pro Person ggf. entfallen könnte. Die Klimaschutzziele im Wohngebäudebestand werden bezogen auf 2050 mit -70,5-73,0 % (vgl. mit 1990) deutlich verfehlt und es verbleiben in 2050 hohe Anteile fossiler Anlagen. Dabei ist fraglich, inwiefern diese bei der erreichten Gebäudeeffizienz in 2050 mit anderen Wärmeversorgungsanlagen wie Wärmepumpen ausgetauscht werden könnten.

⁶³Als besondere Probleme seien bspw. mangelnde Kellerdeckenhöhen oder aufsteigende Feuchtigkeit im Mauerwerk durch Nichttrocknen nach Dämmung (behinderter Luftaustausch) der Außenwand genannt.

In Kapitel 5 wird der **derzeitige Trend bei endogen berechnetem Ökonomiefaktor** mit dem weiterentwickelten Modell betrachtet. Die Trendbetrachtung wird einerseits mit einer **Beibehaltung der Fördermodalitäten vor Anpassung Juli 2022** (Abschnitt 5.7) und andererseits mit **angepasster Förderung ab 2022** durchgeführt (Abschnitt 5.8). Die Kombination aus erhöhten Energiekosten, höheren Baukosten und der Förderbedingungen bis 2022 führen zu deutlichen Impulsen bei der Modernisierungsrate von 1,0 auf 1,31 %/a in 2022 und weiter steigend (bis 2025 auf ca. 1,4 %/a danach abhängig vom CO_2 -Preisszenario). Die Impulse des Klimaschutzprogramms 2030 („Klimapaket“) sind mit einer Steigerung von 1,0 auf 1,04 % in 2021 noch überschaubar. Die Steigerung in 2022 infolge der deutlichen Steigerungen der Energiekosten fällt dagegen signifikanter aus. Die Integration der neuen Förderbedingungen ab 2022 führt in Abschnitt 5.8 zu einer wesentlichen Reduzierung der vorherigen Steigerung, so dass der Effekt der hohen Energiekosten auf die Modernisierungskosten zum Teil ausbleibt. Die Modernisierungsrate steigt von 1,04 auf 1,1 %/a in 2022. Hierbei sollte für Vergleiche mit der realen Modernisierungsrate bedacht werden, dass im Modell von einheitlichen neuen Förderbedingungen in 2022 ausgegangen wird. Tatsächlich waren bis Juli 2022 allerdings noch die höheren Förderquoten aktiv und führten in Verbindung mit den steigenden Energiekosten auch zu spürbar höheren Förderausgaben (siehe 9,6 Mrd. Euro bis Juli 2022 vgl. mit 8 Mrd. Euro 2021 gesamt [29]).

Ergebnisse bei exogener Variation von Neubau, Rückbau, Modernisierung und Wohnflächenverbrauch:

In Abschnitt 4.2 wird die Möglichkeit der **Zielerreichung durch eine Erhöhung der Modernisierungsrate** untersucht. Dies geschieht in 4.2 durch einen exogenen Eingriff in die Parameterwerte der Gleichung 15. Der exogene Eingriff in die Parameterwerte zeigte bereits, dass die Modernisierungsrate im Modell nicht einfach beliebig erhöht und auf diesem hohen Niveau gehalten werden kann. Aufgrund des Kopplungsprinzips ist die Modernisierungsrate eng an den Sanierungszyklus gebunden. Dadurch werden vor allem Vollmodernisierungen tendenziell nur vorgezogen oder verzögert. Kleinere Maßnahmen, die auch mit Eigenleistung durchgeführt werden können, könnten wirtschaftlich auch ohne Sanierungsbedarf angestoßen werden. Dies wird im Modell allerdings nicht berücksichtigt. Das dargestellte Szenario in 4.2 ist als obere Grenze des sinnvoll anzustrebenden Modernisierungsgrades in 2050 im Modell anzusehen. Die betrachtete resultierende Modernisierungsrate ist mit ihrer hohen Steigung zu Beginn des

Betrachtungszeitraums ohne Sprünge als idealtypisch anzusehen. Idealtypisch da durch den stetigen Charakter die Baubranche sich besser auf die Aufgaben einstellen kann und es so möglichst nicht zu hohen Abweichungen bei Bedarf und Angebot (möglichen Bauvolumina) kommt. Kann der Bedarf nicht gedeckt werden, kann dies zu Baukostensteigerungen führen, während ein zu geringer Bedarf und zu hohes Angebot wiederum in wirtschaftliche Risiken für die tätigen Firmen und damit auch als Risiko für die Arbeitsplätze werden kann. Als Ergebnis der Betrachtung kann festgehalten werden, dass eine reine Erhöhung der Modernisierungsrate nicht zielführend ist. Die **Erhöhung der Modernisierungsrate ist vielmehr die Grundlage für eine zielführende Transformation der Wärmeversorgung** und verringert durch erhöhte Effizienz die notwendigen Mengen an Erneuerbaren.

Abschnitt 4.3 befasst sich mit den **Potenzialen eines reduzierten Flächenverbrauchs** auf die Klimaschutzziele im Wohngebäudebestand. Das Reduktionspotenzial eines reduzierten Flächenverbrauchs ist dabei hinsichtlich des Betriebs der Gebäude vor allem durch den Rückbau und Ersatz nicht effizienter Gebäude begründet. Die Höhe des Potenzials ist wesentlich durch das Verhältnis des Rückbaus zum Neubau und den Rückbauvolumina bestimmt. Nicht beantwortet werden kann, inwiefern sich reduzierte Flächenangebote für Neubau auf das Verhältnis von MFH zu EFH auswirken. Es wird in Abschnitt 4.3 angenommen, dass die betrachtete Korrelation⁶⁴ weiterhin gültig ist. Aufgrund der Annahme ergeben sich hohe Anteile (ca. 80 %) EFH am Neubau. Durch einen Fokus auf hocheffiziente MFH im Neubau könnten stattdessen weitere Reduktionspotenziale durch Maßnahmen mit reduziertem Flächenverbrauch erzielt werden. Maßnahmen für einen reduzierten Flächenverbrauch können als ergänzende flankierende Maßnahme eingesetzt werden. Nicht zu vernachlässigen sind auch mögliche weitere Reduktionspotenziale durch die Einsparungen von grauer Energie durch reduzierten Neubau. Reduzierte Neubaubemühungen könnten dazu Kapazitäten zur Modernisierung des Bestands freistellen. Dies steht aber immer im Spannungsfeld mit der Wohnflächennachfrage.

In Kapitel 4 werden entsprechend neben dem Trendszenario Varianten mit exogen veränderter Neubau-, Rückbau- und Modernisierungsrate untersucht. Keine dieser Optionen ist für sich alleine als zielführend einzuordnen.

⁶⁴Vgl. Punkte 2.3.3 & 2.3.4 sowie Abbildung 24: Anteil MFH steigt mit dem Wohnflächenzuwachs.

Untersuchung zielführender wirtschaftlicher Rahmenbedingungen durch endogene Simulation der Modernisierungsrate in Abhängigkeit der Wirtschaftlichkeit von Modernisierungsmaßnahmen:

In Kapitel 5 wird der vorher konstante Ökonomiefaktor in Gleichung 15 endogen modelliert, so dass sich eine Abhängigkeit der Modernisierungsrate von den wirtschaftlichen Rahmenbedingungen ergibt. Hierzu wird der Entscheidungsprozess als erstes analysiert und darauf aufbauend der Ökonomiefaktor aus der Perspektive der selbstnutzenden Gebäudeeigentümer modelliert. Durch die Betrachtung aus der Perspektive der Selbstnutzer sind mögliche Mietanpassungen kein bestimmender Parameter für die Wirtschaftlichkeit. Damit ist die Betrachtung mit einer warmmietenneutralen Mieterhöhung zu vergleichen (zusätzliche Einnahmen = Energiekosteneinsparung).

Als relevante Investitionskosten werden Vollkosten abzüglich Förderung betrachtet. Das Koppelungsprinzip und die Amortisation energiebedingter Mehrkosten werden durch die Kombination von Ökonomiefaktor und Sanierungsfaktor abgebildet. Hierdurch ergibt sich eine zeitliche Gewichtung der Kosten. Werden Modernisierungen deutlich vorgezogen, ist der Sanierungsdruck deutlich geringer. Dies kann indirekt mit einem geringeren Anteil Sowieso-Kosten und höheren energiebedingten Mehrkosten übersetzt werden. Ein Vorzug ist bezogen auf die Sowieso-Kosten wirtschaftlich nachteilig zu bewerten, da dies zu einer geringeren ausgenutzten Lebensdauer und höheren Wertigkeit des früher investierten Geldes (Diskontierung) führt. Entsprechend wird mit der Kombination von Ökonomiefaktor und Sanierungsfaktor durch Gleichung 15 eine statische Aufteilung der Investitionskosten in Sowieso-Kosten und energiebedingte Mehrkosten in eine zeitlich dynamische Aufteilung transformiert.

In Abschnitt 5.5 werden für drei aus der Literatur abgeleiteten Gruppen von Entscheidertypen für die Integration in den Ökonomiefaktor Formeln in Abhängigkeit der Amortisationsdauer entwickelt. Form, Steigung und Grundwert dieser Formeln werden auf Grundlage des Entscheidungsprozess, der Eigenschaften der Entscheidertypen und hinsichtlich der erwarteten Modernisierungsrate bei bekannten wirtschaftlichen Rahmenbedingungen (2018-2021) sowie den Auswirkungen des Klimaschutzprogramms 2030 (Klimapaket) als weitere Richtmarke gewählt. Eine Verbesserung von Form, Steigung und Grundwert wäre durch die sehr sprunghaften wirtschaft-

lichen Rahmenbedingungen der Jahre 2022+ sehr interessant, sobald belastbare Daten hierzu vorliegen.

Durch die deutlichen Preissteigerungen und die Anpassungen der Fördermodalitäten in 2022 sind die **Effekte des Klimaschutzprogramms 2030** (Klimapaket) deutlich weniger auffällig. Das Klimapaket zeigt für 2021 eine Steigerung der Modernisierungsrate von 1 auf 1,04 %/a. Daraus ergeben sich mit CO_2 -Preisszenario a) im Vergleich zum Trend mit den Bedingungen vor dem Klimapaket zusätzliche Einsparungen von 3,71 Mio. t in 2030 für den Wohngebäudebestand im Modell (vgl. 4,4 Mio. t Einsparungen in 2030 im Gebäudesektor in [73]).

Die **Auswirkungen der Einführung der CO_2 -Steuer** werden in Abschnitt 5.7 mit alten Förderbedingungen und in Abschnitt 5.8 mit den neuen Förderbedingungen an vier Preisszenarien simuliert. Dass die CO_2 -Steuer bereits zu Beginn des Betrachtungszeitraums einen Einfluss hat, kann an der ähnlichen Steigerung der Modernisierungsrate im Vergleich zum CO_2 -Preisverlauf abgelesen werden. Alle Szenarien mit CO_2 -Steuer weisen in 2023 einen Knick auf (vgl. Abbildung 45 & Abbildung 48), der durch die Veränderung der Steigung des CO_2 -Preises ausgelöst wird (5 €/a 2021-2023 & 10 €/a 2023-2025). Die Unterschiede der CO_2 -Preisszenarien werden hauptsächlich erst gegen Ende des Betrachtungszeitraums deutlich sichtbar, da die Preisverläufe dort die größten Differenzen aufweisen. Für deutliche Impulse durch die CO_2 -Steuer sind mit und ohne neue Förderbedingungen signifikante Preise notwendig. Dies ist mit den hohen Investitionskosten in der Baubranche zu begründen. Daneben wird eine Anhebung der Modernisierungsrate auch bei signifikanten Impulsen durch die Langlebigkeit der Bauteile und den sich durch das Kopplungsprinzip daraus ergebenden wirtschaftlichen Effekt mit steigender Modernisierungsrate gedämpft.

In Abschnitt 6.1 werden die sich in den vier Preisszenarien ergebenden **CO_2 -Einnahmen bis 2050** bei alten und neuen Förderbedingungen den Einnahmen bei einer Reinvestition gegenübergestellt (siehe Abbildung 54). Bei einer linearen Steigerung nach 2025 (Szenario a)) bleiben die Einnahmen nach 2025 nahezu konstant. Im Szenario b) mit der stärksten progressiven Steigerung des Preises steigen die Einnahmen hingegen nahezu linear an. In Szenario b) gleicht die zunehmende Steigung des Preisverlaufs damit die rückläufigen CO_2 -Emissionen aus.

In Kapitel 6 wird die Reinvestition der zweckgebundenen CO_2 -Einnahmen aus dem Wohngebäudebestand in die Modernisierung des Wohngebäudebestands betrachtet, um einen Impuls zur Steigerung der Modernisierungsrate zu geben. Die Auswirkungen der CO_2 -Einnahmen verhalten sich dabei wie ein direkter Förderzuschuss, der auf alle Modernisierungen im Modell angewendet wird. Die Förderhöhen stehen in Abhängigkeit der CO_2 -Einnahmen (bestimmt durch Emissionsmengen & CO_2 -Preise) und Modernisierungsvolumina. Ab CO_2 -Einnahmen von 8-10 Mrd. €/a übersteigen die Reinvestitionen die zusätzlichen staatlichen Förderausgaben bei Beibehaltung der alten Förderbedingungen von vor 2021. Die Reinvestition erzeugt damit durchaus deutliche Impulse, aber auch durch die Reinvestition kann die Modernisierungsrate nicht so weit erhöht werden, dass keine weiteren Maßnahmen notwendig wären.

Neben einer Steigerung der Modernisierungsrate kann durch die Reinvestition die Lenkungswirkung des CO_2 -Preises als zentrales Steuerungselement verbessert werden. Gegebenenfalls kann durch die Reinvestition auch die Akzeptanz erhöht werden, da die Einnahmen zweckgebunden sind und so einerseits einfach nachzuvollziehen ist wohin die Gelder fließen und andererseits jeder Gebäudeeigentümer damit auch Zugriff auf diese Gelder hat.

Fazit und Empfehlungen:

Das Erreichen der Klimaneutralität im Wohngebäudebestand wird durch lange Lebensdauern und dadurch lange Austauschzyklen bzw. im Gebäudebereich Sanierungszyklen, erschwert. Dies resultiert selbst bei wirtschaftlich attraktiven Bedingungen zielkonformer Lösungen in einem langsamen und langen Transformationsprozess, so lange es nicht gelingt, dass die Modernisierung ohne Kopplung mit der Sanierung wirtschaftlich ist. Einen solchen Zustand für einen Großteil des Wohngebäudebestands zu erreichen, ist ohne den Einsatz drastischer Maßnahmen aber unrealistisch, da mehrere Effekte dem entgegenwirken.

Effekte die einer Entkopplung von Modernisierung und Sanierung entgegenwirken:

1. Die Höhe der Baukosten im Vergleich zu den Energieeinsparpotenzialen resultiert bereits im Ausgangszustand des Betrachtungszeitraums (hoher Anteil Gebäude mit hohem Einsparpotenzial) in einer langsamen Amortisation.
2. Die durchschnittlichen Energieeinsparpotenziale der potenziell modernisierbaren Gebäu-

de sinkt im Laufe des Betrachtungszeitraums, da neuere Baualterklassen bereits einen besseren energetischen Ausgangszustand aufweisen.

3. Die Effizienz eingesetzter Gelder bei einer Erhöhung der Förderung und Reinvestition der CO_2 -Einnahmen sinkt durch Mitnahmeeffekte mit der eingesetzten Menge, da die zusätzlichen Mittel hauptsächlich auf bereits Modernisierende ausgeschüttet werden (siehe auch [113]).

In Abschnitt 6.3 wird beispielhaft dargestellt **mit welchen Maßnahmen ein klimaneutraler Wohngebäudebestand bis 2045 erreicht werden kann**. Es werden teilweise drastische Maßnahmen benötigt, die bei einer entsprechenden frühzeitigen Kommunikation und unterstützenden Förderbedingungen aber durchaus realistisch sind. Die Maßnahmen folgen dabei grundsätzlich dem Ziel durch gute wirtschaftliche Rahmenbedingungen einen zielführenden Pfad einzuschlagen. Verbleibende nicht zielführende Strukturen werden durch eine ergänzende Gesetzgebung zum Wechsel auf alternative Energieträger gezwungen. Hierdurch soll erreicht werden, dass Verbote nur in Ausnahmefällen zum Einsatz kommen müssen und dort wo sie angewendet werden ein Wechsel durch gute wirtschaftliche Rahmenbedingungen niederschwellig durchzuführen ist. Als Ausgangsbasis für die erweiterten Maßnahmen dient deshalb das CO_2 -Preisszenario b) mit Reinvestition der CO_2 -Einnahmen, welches durch die Reinvestition und eine hohe CO_2 -Steuer die besten wirtschaftlichen Rahmenbedingungen der betrachteten Szenarien bietet.

Um die **Effizienz der eingesetzten monetären Mittel** (Förderung oder reinvestierte Mittel) zu erhöhen, könnte ein gezielter Fokus bei der Förderung auf Bauelemente mit derzeit niedrigen Modernisierungsraten (Fassade, Keller) und hohen Einsparmöglichkeiten gelegt werden. Die Fassadendämmung ist bei der thermischen Gebäudehülle besonders hervorzuheben, da sie die längste Lebensdauer, den geringsten Sanierungsdruck⁶⁵, hohe Einsparmöglichkeiten und hohe Kosten aufweist. Durch den Fokus auf die Erhöhung der Modernisierungsraten bei der Fassadendämmung könnte die Effizienz der eingesetzten Fördermittel deutlich gesteigert werden. Die Effizienz einer solchen Maßnahme konnte aber nicht durch das Modell untersucht werden, da hierzu eine Untersuchung auf Bauteilebene notwendig wäre. Daneben weist die Kellerdecke bei der thermischen Gebäudehülle ebenfalls geringe Modernisierungsraten und damit ein Verbesserungspotenzial auf.

⁶⁵ Auch wenn sanierungsbedürftig tendenziell keine Sanierung zwingend notwendig.

Abseits der thermischen Gebäudehülle sind die **Wärmeversorgungsanlagen** entscheidend. Die Austauschraten sind hier durch geringere Lebensdauern und einen hohen Sanierungsdruck (die Einsatzfähigkeit der Wärmeversorgungsanlage kann als zwingend notwendig eingestuft werden) entsprechend hoch. Im Modell konnten diese Austauschraten für zielführende Modernisierungen allerdings nur durch Verbote gehoben werden⁶⁶. Aber selbst bei Verboten wären Lösungen für ausfallende Anlagen notwendig, die kurzfristig und ggf. übergangsweise eingesetzt werden können, um soziale Härten zu vermeiden. Um die hohen Austauschraten entsprechend zielführend nutzen zu können, werden neuartige Konzepte benötigt, die schnell, ohne umfassende vorherige Modernisierung und trotzdem potenziell klimaneutral sind. Dies könnte z.B. durch Wärmepumpen in Kombination mit Gasanlagen geleistet werden. Da die Gasanlage nur übergangsweise genutzt werden sollte, könnte diese über ein Leasing angeboten werden, bis das Gebäude modernisiert wird und die Wärmepumpe die Versorgung eigenständig übernehmen kann. Hierdurch können die zusätzlichen Investitionskosten für die Gebäudeeigentümer gesenkt werden. Damit kann eine Alternative zum reinen Austausch von z.B. Gasanlagen geboten werden, diese schneller aus dem System gedrängt werden, ein Markt für Altanlagen entstehen und bestehende Anlagen so möglichst lange über ihre Lebensdauer in mehreren Gebäuden eingesetzt werden. Daneben entsteht ein Anreiz für den Gebäudeeigentümer das Gebäude nach Installation der Wärmeversorgungsanlage zu modernisieren und so die laufenden Leasinggebühren einzusparen.

7.2 Limitationen

Die Modellierung von **Vollmodernisierungsäquivalenten (VM)** ist eine Abstraktion und Vereinfachung der wesentlich komplexeren Realität. Aus mehreren Gründen kann statt einer Vollmodernisierung die Modernisierung einzelner Bauteile favorisiert werden. Die Modernisierung einzelner Bauteile ist aufgrund des geringeren zeitlichen Aufwands mit einer geringeren Beeinträchtigung für die Bewohner verbunden. Daneben ist die Modernisierung einzelner Bauteile finanziell leichter zu stemmen, auch wenn sich finanzielle Synergieeffekte bei einer Vollmodernisierung ergeben können (z.B. Mehrfachnutzung des Baugerüsts für Dach und Fassade).

⁶⁶Hintergrund ist, dass im Modell eine Modernisierung als notwendige Voraussetzung für die Installation einer Wärmepumpe angenommen wird.

Des Weiteren sind aufgrund unterschiedlicher Lebensdauern die Bauteile vielfach differenziert hinsichtlich ihrer Sanierungsbedürftigkeit zu bewerten.

Durch eine Modellierung auf Bauteilebene ergeben sich deutlich mehr Freiheitsgrade und Optionen für den Gebäudeeigentümer, die im Modell zu deutlich mehr Varianten führen. Dies wäre hinsichtlich einer detaillierten Betrachtung der Fassade und der Kellerdecke vorteilhaft, da diese Bauteile kein Ausfallen nach Erreichen der Lebensdauer erwarten lassen. Vielmehr sind es optische Mängel, die zu einem Sanierungsbedarf bei der Fassade oder Kellerdecke führen. Die tragenden Fassadenteile und die Kellerdecke sind in den seltensten Fällen nicht mehr funktionstüchtig. Damit entsteht deutlich weniger Druck für den Eigentümer zu sanieren und eine Sanierung kann entweder verzögert oder gar nicht in Betracht gezogen werden. Entsprechend kann es dazu kommen, dass Dach und Fenster zum Großteil mit fortschreitendem Betrachtungszeitraum modernisiert sind und danach die Modernisierungsrate sinkt.

Die Betrachtung der **Wärmeversorgungsanlagen im Modell** wird auf die wichtigsten beschränkt. Zum Beispiel werden keine Durchlauferhitzer im Modell betrachtet. Ein vollständiger Ersatz ist aber unwahrscheinlich, da diese kostengünstig und in Kombination mit einer Anlage für die Raumwärme für Vermieter deutliche Vorteile aufweisen können (z.B. auch hinsichtlich Trinkwasserhygiene). Als Konsequenz sind erhöhte Strombedarfe im Vergleich zu den Ergebnissen im Modell durch die Nutzung von Durchlauferhitzern denkbar. Gleichzeitig führt dies im nächsten Schritt aber auch dazu, dass bei Kombination mit einer Wärmepumpe die Jahresarbeitszahl der Wärmepumpe gesteigert werden kann. Denn diese kann dann entsprechend der benötigten Vorlauftemperaturen, die in den meisten Fällen deutlich niedriger als die Warmwassertemperatur und die notwendige Temperatur zur Legionellenvorbeugung ist, gesteuert werden.

Durch die genutzte Struktur bei der Modellierung der Wärmeversorgungsanlagen kann es zu dem Fall kommen, dass die Austauschrate unterschätzt wird. Dies kann geschehen, da der Wechsel auf Wärmepumpen an eine Vollmodernisierung gekoppelt ist. Damit ist der simulierte Sanierungsbedarf des Gebäudes immer wichtiges Kriterium für einen Wechsel auf eine Wärmepumpe. Zum derzeitigen Zeitpunkt ist eine Verbesserung der thermischen Gebäudehüllen in Altbauten für den Einsatz von Wärmepumpen wirtschaftlich ratsam bzw. teilweise auch technisch notwendig. Dies kann aber durch die Abdeckung höherer maximal Temperaturen

neuer Wärmepumpengenerationen und vorteilhafte Rahmenbedingungen (niedrige Strompreise im Vergleich zu existierendem Energieträger) umgangen werden, so dass ein direkter (ohne Modernisierung TGH) und vollständiger Ersatz (Raumwärme & Warmwasser) von fossilen Anlagen in Altbauten durch Wärmepumpen in Betracht gezogen werden kann.

In den Szenarien werden unterschiedliche Förderbedingungen und die Reinvestition der CO_2 -Maßnahmen simuliert. Eine **Rückkopplung unterschiedlicher Förderhöhen auf wirtschaftliche Rahmenbedingungen** wie bspw. steigende Baupreise durch erhöhte Nachfrage bei guten Förderbedingungen wird nicht analysiert. Erhöhte Geldmittelflüsse, die sich bspw. aus besseren Förderbedingungen ergeben, können durch eine Steigerung der Nachfrage die Bau- und Modernisierungskosten steigen lassen. Durch die Steigerung entsteht eine Rückkopplung, die die Nachfrage wiederum reduziert, und so einen dämpfenden Einfluss hat. Eine dynamische Preisberechnung inkl. Rückkopplung der Förderung auf die Baupreise ist nicht im Modell abgebildet. Für eine dynamischen Preisberechnung ergeben sich weitere Fragestellungen, da die Förderung nur einen von vielen möglichen Einflussfaktoren auf die Baukosten darstellt. Hierfür sind neben Ergebnissen aus dem Modell (bspw. Modernisierungs- & Bauvolumina) auch Annahmen notwendig, wie z.B. die Entwicklung der Baubranche. Im Modell werden statt einer dynamischen Preisberechnung in den Szenarien, mit Ausnahme der Änderungen von 2021 auf 2022, jeweils nur geringe, aber stetige Änderungen hinsichtlich der wirtschaftlichen Rahmenbedingungen durchgeführt. Damit soll gewährleistet werden, dass sich die Baubranche auf Veränderungen bei Angebot und Nachfrage einstellen kann und so die Effekte der Nichtbetrachtung von dynamischen Preisen minimiert werden.

Weiterhin wären für eine dynamische Preisberechnung auch die **Berücksichtigung der Kapitalbeschaffung** zu nennen, da sich auch bei gleichbleibenden Preisen die Realisierung wesentlich durch steigende Zinsen oder geringere Vermögen seitens der Eigentümer erschwert werden kann. Der Einfluss steigender Zinsen wächst entsprechend mit dem Investitionsvolumen. Demnach kann angenommen werden, dass Eigentümer bei höheren Zinsen vermehrt auf Teilmodernisierungen setzen. Dies wird auch durch den vielfach in der Literatur genannten bevorzugten Spar- und Investitionszyklus der wichtigsten Eigentümergruppe (den Privaten) unterstrichen (siehe [100]).

Die Berechnung der **Anteile der wirtschaftlichen Entscheidungstypen** ist vereinfacht. Die Anteile der Entscheidungstypen werden rein durch deren Modernisierungsverhalten verändert, damit wird vom Modernisierungsverhalten abgesehen eine konstante Verteilung angenommen. Hierdurch werden Effekte wie die Übergabe der Entscheidungsgewalt älterer Generationen an die Nachkommen und damit auch wahrscheinlich andere Entscheidungstypen sowie die allgemeine Veränderung des Gedankenguts und damit die Neueinsortierung in eine andere Gruppe nicht betrachtet. Es ist gut möglich, dass durch diese zwei Effekte der zahlenmäßige Anteil Ökomodernisierer im Verlauf des Betrachtungszeitraums ggü. dem Ausgangswert von 25 % steigt und hiermit auch die Modernisierungsrate.

7.3 Ausblick

Das entwickelte Modell bietet ein Grundgerüst, das in vielfältiger Weise weiterentwickelt werden kann. Ansatzpunkte für weiterführende Forschungsarbeiten ergeben sich zum Beispiel direkt aus den Limitationen der Arbeit. Daneben werden weitere und einige mit besonderer Relevanz im Folgenden vorgestellt.

Die Nutzung der Gleichung 15 für VM stellt eine der zentralen Limitationen dar. Die Gleichung 15 kann aber theoretisch auch auf Bauteilebene angewendet werden. Gemittelte Einsparungen je Bauteilemodernisierungen wären hierfür eine einfache Methodik, um nicht zahlreiche Varianten hinsichtlich der thermischen Ergebnisse berechnen zu müssen. Hierdurch können Teilmodernisierungen direkt im Modell berücksichtigt werden und auch die unterschiedlichen Modernisierungsraten der Bauteile sowie die sich daraus ergebenden energetischen Bedingungen des Gebäudebestands besser analysiert werden. Aus den Erkenntnissen lassen sich ggf. spezifische Maßnahmen für die Adressierung der zu erwartenden Schwachstellen (Fassade & Kellerdecke) ableiten. Darauf aufbauend können auch Variationen wie z.B. unterschiedliche Dämmstärken und Ausführungsarten für Bauteilmodernisierungen betrachtet werden.

Die Potenziale eines reduzierten Flächenverbrauchs werden in Abschnitt 4.3 angeschnitten. Dies ist allerdings keine detaillierte Untersuchung dieser Potenziale, da sich eine Vielzahl an Beeinflussungsmöglichkeiten und daraus variierender Rückkopplungen auf die energetischen Rahmenbedingungen des Wohngebäudebestands ergeben. Auch aus der Betrachtung in Abschnitt 4.3

ergeben sich bereits anschließende Fragestellungen. Beispielsweise ist es fraglich, wie sich ein reduziertes Flächenangebot und ein sich daraus ergebender reduzierter Flächenverbrauch auf das Verhältnis von neugebauten Einfamilien- zu Mehrfamilienhäusern auswirkt. Im Modell wird angenommen, dass sich aus einem reduzierten Bauvolumina (reduzierte Nachfrage nach Wohnungen), wie auch in der Vergangenheit, ein erhöhter Anteil Einfamilienhäuser ergibt. Da bei einem reduziertem Flächenangebot aber die Angebotsseite reduziert wird und nicht die Nachfrageseite, ist stattdessen ein gegenteiliges Verhalten wahrscheinlich. Aus einem so erhöhten Anteil von Mehrfamilienhäusern bei den Neubauten ergeben sich zusätzliche Einsparpotenziale bei einer höheren Anzahl von Wohnungen.

Die Ökonomiefaktoren sind das zentrale Element zur Berücksichtigung der wirtschaftlichen Rahmenbedingungen in Gleichung 15. Für eine Verbesserung von Form, Steigung und Grundwert der für die Ökonomiefaktoren ($ecof_{i,j}(n)$) relevanten Gleichungen 23-25, wäre eine Auswertung der sehr sprunghaften wirtschaftlichen Rahmenbedingungen der Jahre 2022+ sehr interessant, sobald belastbare Daten hierzu vorliegen.

Anhang

Tabelle 35: Vergleich Barwerte verschiedener Modernisierungsmaßnahmen für ein EFH 2016 vs. 2020, (Numerische Ergebnisse zu Abb. 44)

Konzept für thermische Gebäudehülle bei KfW85 gas identisch mit KfW85 WP. Aufgrund der Primärenergiebeschränkung wird bei Gas nur die Förderung für KfW115 erzielt. Für KfW85 Mod Gas wird das KfW85 Konzept für die Gebäudehülle und die tatsächliche Förderung (KfW115) angesetzt

WVA	Mod	Start	effektive Energiepreissteigerung [%/a]	CO ₂ -Startpreis [€]	Energiekosten (BW) [€/m ²]	CO ₂ -Anteil Energiekosten [-]	Förderung [€/m ²]	Barwerte [€/m ²]
gas	-	2016	0,84	0	342,03	0	6,10	447,85
gas	-	2016	1,00	0	348,56	0	6,10	454,39
gas	-	2016	2,00	0	393,23	0	6,10	499,06
gas	KfW85	2016	0,84	0	144,32	0	85,01	673,30
gas	KfW85	2016	1,00	0	147,08	0	85,01	673,30
gas	KfW85	2016	2,00	0	165,93	0	85,01	694,90
gas	-	2020	0,50	0	275,49	0	6,96	382,62
gas	-	2020	3,49	25	397,27	0,31	6,96	504,40
gas	-	2020	2,47	25	349,31	0,21	6,96	456,44
gas	-	2020	1,85	25	323,64	0,15	6,96	430,78
gas	KfW85	2020	0,50	0	117,29	0	161,71	624,41
gas	KfW85	2020	3,49	25	169,14	0,31	161,71	676,26
gas	KfW85	2020	2,47	25	148,72	0,21	161,71	655,84
gas	KfW85	2020	1,85	25	137,79	0,15	161,71	644,91
gas	-	2020	1,00	252,55	545,68	0,50	6,96	659,37
gas	-	2020	2,00	187,55	542,86	0,49	6,96	656,54
gas	-	2020	3,00	132,55	545,03	0,49	6,96	658,72
gas	-	2020	4,00	82,55	547,45	0,50	6,96	661,13
gas	KfW85	2020	4,00	82,55	233,07	0,50	161,71	740,19
WP	KfW55	2016	2,00	0	147,66	0	203,21	704,40
WP	KfW70	2016	2,00	0	156,11	0	161,15	728,02
WP	KfW85	2016	2,00	0	184,39	0	122,62	761,06
WP	KfW55	2016	1,00	0	126,69	0	203,21	681,05
WP	KfW55	2016	3,90	0	178,16	0	203,21	734,91
WP	KfW70	2016	2,00	0	153,34	0	161,15	727,22
WP	KfW85	2016	2,00	0	174,99	0	122,62	751,65
WP	KfW55	2020	0,50	0	126,44	0	309,46	651,83
WP	KfW70	2020	0,50	0	133,67	0	260,60	677,67
WP	KfW85	2020	0,50	0	157,90	0	209,93	711,27
WP	KfW55	2020	0,50	0	120,08	0	309,46	645,46
WP	KfW55	2020	3,49	0	173,15	0	309,46	698,55
WP	KfW70	2020	0,50	0	131,29	0	260,60	675,28
WP	KfW85	2020	0,50	0	149,83	0	209,93	703,21
WP	KfW55	2020	0,50	0	120,08	0	524,14	430,75

Entwicklung der Bevölkerung Deutschlands bis 2060 ¹

Variante 2: Moderate Entwicklung der Geburtenhäufigkeit, Lebenserwartung und Wanderung

Geburtenrate 1,55 Kinder je Frau, Lebenserwartung bei Geburt 2060 für Jungen 84,4/Mädchen 88,1 Jahre, durchschnittlicher Wanderungssaldo 221 000 Personen pro Jahr (G2-L2-W2)

Alter von ... bis unter ... Jahren	Jahr (jeweils 31.12.)					
	2018 ¹	2020	2030	2040	2050	2060
Altersgrenze 20 und 60 Jahre						
Bevölkerungsstand						
in 1000						
Insgesamt	82 902	83 365	83 341	82 091	80 200	78 213
unter 20	15 254	15 298	15 704	14 908	14 086	14 101
20 - 60	44 413	43 947	39 795	39 133	37 382	35 638
60 und mehr	23 235	24 120	27 841	28 051	28 732	28 474
%						
Insgesamt	100	100	100	100	100	100
unter 20	18,4	18,4	18,8	18,2	17,6	18,0
20 - 60	53,6	52,7	47,8	47,7	46,6	45,6
60 und mehr	28,0	28,9	33,4	34,2	35,8	36,4
2018 = 100						
Insgesamt	100	100,6	100,5	99,0	96,7	94,3
unter 20	100	100,3	102,9	97,7	92,3	92,4
20 - 60	100	99,0	89,6	88,1	84,2	80,2
60 und mehr	100	103,8	119,8	120,7	123,7	122,5
Jugend-, Alten-, Gesamtquotient						
Auf 100 20- bis unter 60-Jährige kommen						
unter 20-Jährige	34,3	34,8	39,5	38,1	37,7	39,6
60-Jährige und Ältere	52,3	54,9	70,0	71,7	76,9	79,9
Zusammen	86,7	89,7	109,4	109,8	114,5	119,5
Altersgrenze 20 und 65 Jahre						
Bevölkerungsstand						
in 1000						
Insgesamt	82 902	83 365	83 341	82 091	80 200	78 213
unter 20	15 254	15 298	15 704	14 908	14 086	14 101
20 - 65	49 849	49 776	46 001	44 022	42 990	40 702
65 und mehr	17 799	18 291	21 635	23 162	23 123	23 410
%						
Insgesamt	100	100	100	100	100	100
unter 20	18,4	18,4	18,8	18,2	17,6	18,0
20 - 65	60,1	59,7	55,2	53,6	53,6	52,0
65 und mehr	21,5	21,9	26,0	28,2	28,8	29,9
2018 = 100						
Insgesamt	100	100,6	100,5	99,0	96,7	94,3
unter 20	100	100,3	102,9	97,7	92,3	92,4
20 - 65	100	99,9	92,3	88,3	86,2	81,7
65 und mehr	100	102,8	121,6	130,1	129,9	131,5
Jugend-, Alten-, Gesamtquotient						
Auf 100 20- bis unter 65-Jährige kommen						
unter 20-Jährige	30,6	30,7	34,1	33,9	32,8	34,6
65-Jährige und Ältere	35,7	36,7	47,0	52,6	53,8	57,5
Zusammen	66,3	67,5	81,2	86,5	86,6	92,2
Altersgrenze 20 und 67 Jahre						
Bevölkerungsstand						
in 1000						
Insgesamt	82 902	83 365	83 341	82 091	80 200	78 213
unter 20	15 254	15 298	15 704	14 908	14 086	14 101
20 - 67	51 826	51 824	48 603	45 801	45 032	42 682
67 und mehr	15 821	16 243	19 034	21 383	21 082	21 430
%						
Insgesamt	100	100	100	100	100	100
unter 20	18,4	18,4	18,8	18,2	17,6	18,0
20 - 67	62,5	62,2	58,3	55,8	56,1	54,6
67 und mehr	19,1	19,5	22,8	26,0	26,3	27,4
2018 = 100						
Insgesamt	100	100,6	100,5	99,0	96,7	94,3
unter 20	100	100,3	102,9	97,7	92,3	92,4
20 - 67	100	100,0	93,8	88,4	86,9	82,4
67 und mehr	100	102,7	120,3	135,2	133,2	135,4
Jugend-, Alten-, Gesamtquotient						
Auf 100 20- bis unter 67-Jährige kommen						
unter 20-Jährige	29,4	29,5	32,3	32,5	31,3	33,0
67-Jährige und Ältere	30,5	31,3	39,2	46,7	46,8	50,2
Zusammen	60,0	60,9	71,5	79,2	78,1	83,2

¹ 2018: Geschätzter Jahresdurchschnitt. Ab 2020 Ergebnisse der 14. koordinierten Bevölkerungsvorausberechnung. Differenzen in den Summen sind rundungsbedingt.

Abbildung 59: Entwicklung der Bevölkerungszahlen bis 2060 (Mittlere Variante G2-L2-W2) [50]

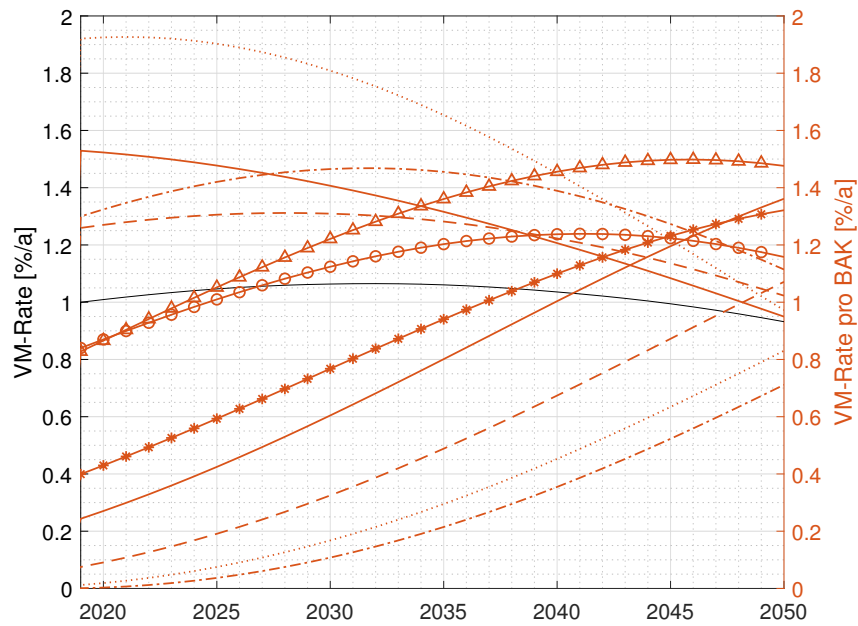


Abbildung 60: VM-Raten gesamt und pro BAK bei LD=45 Jahren & $ecof = 0,6$

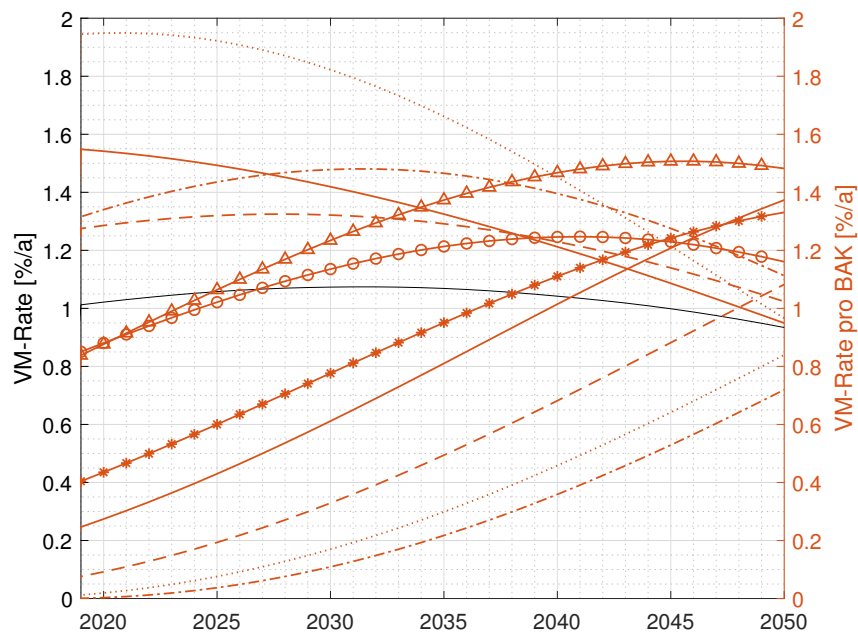


Abbildung 61: VM-Raten gesamt und pro BAK bei LD=50 Jahren & $ecof = 0,75$



Abbildung 62: VM-Raten gesamt und pro BAK bei LD=60 Jahren & $ecof = 1,05$

Basis: 40,6 Mio. Wohnungen in Deutschland

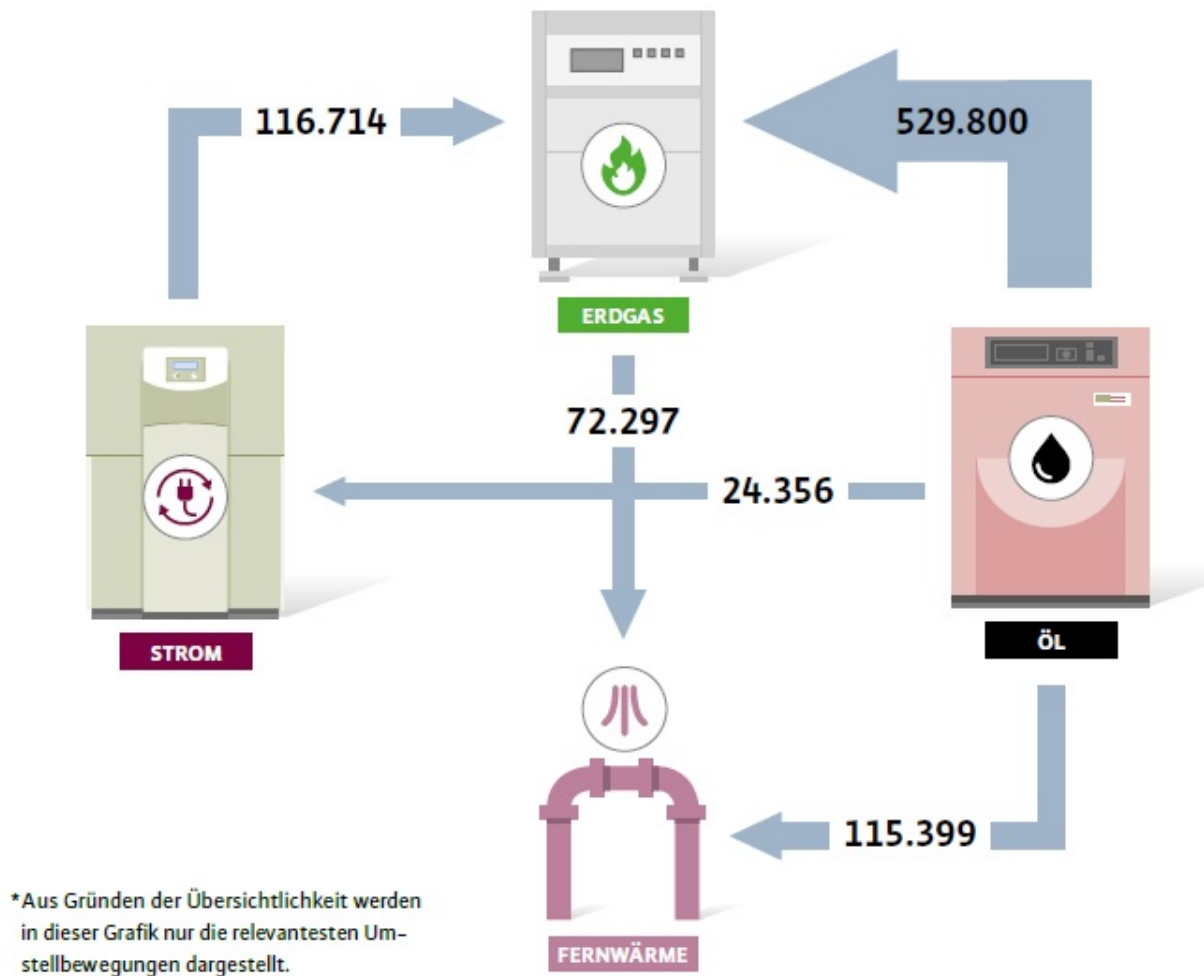


Abbildung 63: Umstellbewegungen bei Hauptenergieträgern 2009-2019 [15]

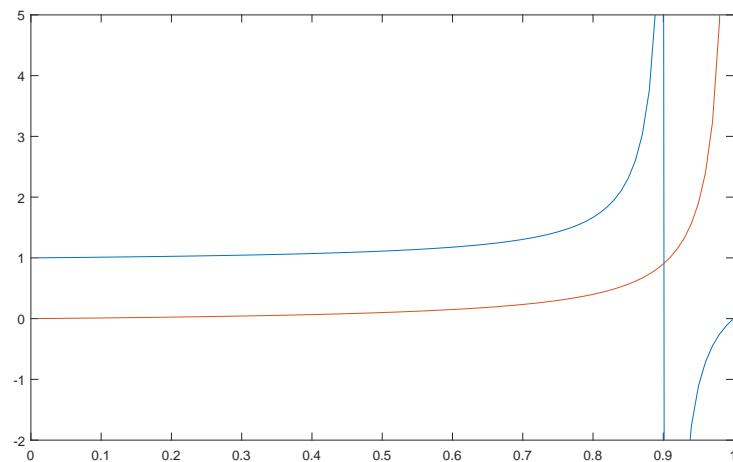


Abbildung 64: Funktionsverläufe für den Faktor Neubau (blau) und Rückbau (orange)

Literatur

- [1] Ackermann, Thomas: *Energiebedarf versus Energieverbrauch unter Einbeziehung von Langzeitmessungen zum Temperaturverlauf*. Bauphysik, 42(1):1–10, 2020.
- [2] AGEB (Hrsg.): *Anwendungsbilanzen zur Energiebilanz Deutschland - Endenergieverbrauch nach Energieträgern und Anwendungszwecken*, 2019. https://ag-energiebilanzen.de/index.php?article_id=29&fileName=ageb_anwendungsbilanz2018_v3.pdf.
- [3] AGEB (Hrsg.): *Satellitenbilanz Erneuerbare Energien 2018*, 2020. <https://ag-energiebilanzen.de/7-0-Bilanzen-1990-2016.htmlx>.
- [4] AGEB (Hrsg.): *Webseite der Arbeitsgemeinschaft für Energiebilanzen e.V. - zuletzt aufgerufen am 23.09.2020*, 2020. <https://www.ag-energiebilanzen.de/>.
- [5] AGEB (Hrsg.): *Webseite der Arbeitsgemeinschaft für Energiebilanzen e.V. - zuletzt aufgerufen am 02.11.2022*, 2022. <https://ag-energiebilanzen.de/faq/definitionen-methodik/>.
- [6] Aldenhoff, Dennis und Kurzrock, Björn Martin: *A modular framework for a dynamic residential building stock model with energy retrofit forecasts*. Energy Efficiency, 17(11), 2024. <https://doi.org/10.1007/s12053-024-10189-x>.
- [7] Amecke, Hermann, Neuhoff, Karsten und Stelmakh, Kateryna: *Tax incentives for thermal retrofits in Germany: Experiences from practitioners*. Technischer Bericht, CPI Report, Climate Policy Initiative, 2012.
- [8] Archer, Wayne R. und Ling, David C.: *The three dimensions of real estate markets: Linking space, capital, and property markets*. Real Estate Finance, 14(3):7–14, 1997.
- [9] ARGE, Arbeitsgemeinschaft für zeitgemäßes Bauen e.V. (Hrsg.): *“Wohngebäude—Fakten 2016. Eine Analyse des Wohngebäudezustandes in Deutschland.”*, 2016.
- [10] Atmaca, Adem und Atmaca, Nihat: *Comparative life cycle energy and cost analysis of post-disaster temporary housings*. Applied energy, 171:429–443, 2016.
- [11] BAK, Bundesarchitektenkammer (Hrsg.): *Energiewende mit Architekten - Strategie der BAK für einen klimaneutralen Gebäudebestand*. Berlin, 2018.

- [12] BBSR, Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung (Hrsg.): *Wohnungsmarktprognose 2030*, 2015.
- [13] BBSR, Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung (Hrsg.): *Wege zur Erreichung eines klimaneutralen Gebäudebestandes 2050*, August 2021.
- [14] BDEW, Bundesverband der Energie- und Wasserwirtschaft e.V. (Hrsg.): *Entwicklung des Wärmeverbrauchs in Deutschland - Basisdaten und Einflussfaktoren*, 2019.
- [15] BDEW, Bundesverband der Energie- und Wasserwirtschaft e.V. (Hrsg.): *Wie heizt Deutschland 2019? BDEW-Studie zum Heizungsmarkt*, 2019.
- [16] BDEW, Bundesverband der Energie- und Wasserwirtschaft e.V. (Hrsg.): *Beheizungsstruktur im Wohnungsneubau in Deutschland 2020 - abgerufen 09/2021*, 2021. <https://www.bdew.de/service/daten-und-grafiken/beheizungsstruktur-wohnungsneubau-aktuell/>.
- [17] BDEW, Bundesverband der Energie- und Wasserwirtschaft e.V. (Hrsg.): *BDEW-Strompreisanalyse Januar 2022 - Haushalte und Industrie - abgerufen 09/2021*, 2022. https://www.bdew.de/media/documents/220124_BDEW-Strompreisanalyse_Januar_2022_24.01.2022_final.pdf.
- [18] BKI, Baukosteninformationszentrum Deutscher Architektenkammern (Hrsg.): *Baukosten - Bauelemente Neubau*, 2019.
- [19] BKI, Baukosteninformationszentrum Deutscher Architektenkammern (Hrsg.): *Baukosten - Bauelemente Neubau*, 2021.
- [20] BMU, Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit (Hrsg.): *Klimaschutzprogramm 2030 der Bundesregierung zur Umsetzung des Klimaschutzplans 2050*. Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit (BMU Berlin), 2019.
- [21] BMUB, Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit (Hrsg.): *Umweltbewusstsein in Deutschland 2014-Ergebnisse einer repräsentativen Bevölkerungsumfrage*. Eigenverlag, Berlin, 2015.

- [22] BMUB, Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit (Hrsg.): *Klimaschutzplan 2050 - Klimapolitische Grundsätze und Ziele der Bundesregierung*. Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit (BMUB Berlin), 2016.
- [23] BMUV, Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, nukleare Sicherheit und Verbraucherschutz (Hrsg.): *Flächenverbrauch - Worum geht es? - abgerufen 02/2023*, 2023. <https://www.bmu.de/themen/nachhaltigkeit-digitalisierung/nachhaltigkeit/strategie-und-umsetzung/flaechenverbrauch-worum-geht-es>.
- [24] BMWi, Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (Hrsg.): *Energieeffizienzstrategie Gebäude, Wege zu einem nahezu klimaneutralen Gebäudebestand.*, 2015.
- [25] BMWi, Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (Hrsg.): *Energiedaten: Gesamtausgabe.*, 2019. <https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Artikel/Energie/energiedaten-gesamtausgabe.html>.
- [26] BMWi, Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (Hrsg.): *Energieeffizienz in Zahlen*, 2019.
- [27] BMWi, Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (Hrsg.): *Zweiter Fortschrittsbericht zur Energiewende - die Energie der Zukunft*, 2019.
- [28] BMWi, Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (Hrsg.): *EEG-Umlage 2022: Fakten & Hintergründe - abgerufen 10/2023*, 2023. [https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Downloads/E/zahlen-und-fakten-zur-eeg-umlage-2022.pdf?__blob=publicationFile&v=4#:~:text=Die%20EEG%20Umlage%202022%20betr%C3%A4gt,\(Anstieg%20von%20103%20Prozent\)](https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Downloads/E/zahlen-und-fakten-zur-eeg-umlage-2022.pdf?__blob=publicationFile&v=4#:~:text=Die%20EEG%20Umlage%202022%20betr%C3%A4gt,(Anstieg%20von%20103%20Prozent).).
- [29] BMWK, Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (Hrsg.): *Pressemitteilung: Bundeswirtschaftsministerium legt Reform der Gebädeförderung vor - Fokus auf Sanierung und Vereinfachung der Antragstellung durch klarere Zuständigkeiten - abgerufen 12/2022*, 2022. <https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Artikel/Energie/energiedaten-gesamtausgabe.html>.

- [30] Breun, Patrick *et al.*: *National Integrated Assessment Modelling zur Bewertung umweltpolitischer Instrumente: Entwicklung des otello-Modellsystems und dessen Anwendung auf die Bundesrepublik Deutschland*, Band 1. KIT Scientific Publishing, 2012.
- [31] BSW, (Hrsg.) Bundesverband Solarwirtschaft e.V.: *Statistische Zahlen der deutschen Solarwärmebranche (Solarthemrie)*, 2021. https://www.solarwirtschaft.de/datawall/uploads/2021/02/BSW_Faktenblatt_Solarwaerme_Update_2020.pdf.
- [32] Bundesregierung: *Generationenvertrag für das Klima*, 2022. <https://www.bundesregierung.de/breg-de/schwerpunkte/klimaschutz/klimaschutzgesetz-2021-1913672-zuletztaufgerufen2023>.
- [33] Bundesregierung: *Deutsche Nachhaltigkeitsstrategie*. Berlin, Aktualisierung 2018.
- [34] Bürger, Veit *et al.*: *Klimaneutraler Gebäudebestand 2050 - Energieeffizienzpotenziale und die Auswirkungen des Klimawandels auf den Gebäudebestand*. Umweltbundesamt, UBA, Dessau-Roßlau, 2017.
- [35] Cichorowski, Georg: *Energetische Gebäudemodernisierung - Ein analytischer Blick auf die Akteure der Gebäude-Energiewende*. 2016.
- [36] Cischinsky, Holger und Diefenbach, Nikolaus: *Datenerhebung Wohngebäudebestand 2016*. Institut Wohnen und Umwelt, Darmstadt, 2018.
- [37] co2online: *Heizkosten pro Quadratmeter im Vergleich*, 2021. <https://www.heizspiegel.de/heizkosten-pruefen/heizkosten-pro-m2-vergleich/-abgerufen10/2021>.
- [38] Daniel-Gromke, Jaqueline, Rensberg, Nadja, Denysenko, Velina, Barchmann, Tino, Oehmichen, Katja, Beil, Michael, Beyrich, W, Krautkremer, B, Trommler, M, Reinholz, T *et al.*: *Optionen für Biogas-Bestandsanlagen bis 2030 aus ökonomischer und energiewirtschaftlicher Sicht*. Dessau-Roßlau, Umweltbundesamt, 2020.
- [39] Datta, Saugato und Mullainathan, Sendhil: *Behavioral design: a new approach to development policy*. *Review of Income and Wealth*, 60(1):7–35, 2014.
- [40] Dechent, Jens und Wagner, Ingo: *Der Wohnungsmarkt aus Sicht der Bautätigkeitsstatistik: Entwicklung und Kennzahlen seit der Jahrtausendwende*, Band 72. Wiesbaden: Statistisches Bundesamt (Destatis), 2020.

- [41] Demary, Markus und Voigtländer, Michael: *Immobilien 2025: Auswirkungen des demografischen Wandels auf die Wohn- und Büroimmobilienmärkte*. IW-Analysen 50, Köln, 2009, ISBN 978-3-602-45448-8. <http://hdl.handle.net/10419/181811>.
- [42] dena, Deutsche Energie-Agentur GmbH (Hrsg.) : *Der dena-Gebäudereport 2016 - Statistiken und Analysen zur Energieeffizienz im Gebäudebestand*. Deutsche Energie-Agentur GmbH (dena), Berlin, 2016.
- [43] dena, Deutsche Energie-Agentur GmbH (Hrsg.) : *dena-Leitstudie Integrierte Energiewende: Impulse für die Gestaltung des Energiesystems bis 2050*. Deutsche Energie-Agentur GmbH (dena), ewi Energy Research & Scenarios gGmbH: Berlin/Köln, Germany, 2018.
- [44] dena, Deutsche Energie-Agentur GmbH (Hrsg.) : *Der dena-GEBÄUDEREPORT KOMPAKT 2019 - Statistiken und Analysen zur Energieeffizienz im Gebäudebestand*. Deutsche Energie-Agentur GmbH (dena), Berlin, 2019.
- [45] dena, Deutsche Energie-Agentur GmbH (Hrsg.) : *Der dena-GEBÄUDEREPORT 2021 - Fokusthemen zum Klimaschutz im Gebäudebereich*. Deutsche Energie-Agentur GmbH (dena), Berlin, 2021.
- [46] dena, Deutsche Energie-Agentur GmbH (Hrsg.) : „Branchenbarometer Biomethan 2021“. Deutsche Energie-Agentur GmbH (Hrsg.), Berlin, 2021.
- [47] dena, Deutsche Energie-Agentur GmbH (Hrsg.): *Gebäudereport 2012: Statistiken und Analysen zur Energieeffizienz im Gebäudebestand*. Berlin, 2012.
- [48] destatis, Statistisches Bundesamt: *Bauen und Wohnen - Mikrozensus - Zusatzerhebung 2014 Bestand und Struktur der Wohneinheiten Wohnsituation der Haushalte*, 2016.
- [49] destatis, Statistisches Bundesamt: *Bauen und Wohnen - Baugenehmigungen/Baufertigstellungen Lange Reihen z.T. ab 1949*, 2019.
- [50] destatis, Statistisches Bundesamt: *Bevölkerung im Wandel - Annahmen und Ergebnisse der 14. koordinierten Bevölkerungsvorausberechnung*, 2019.
- [51] destatis, Statistisches Bundesamt: *Gebäude und Wohnungen - Bestand an Wohnungen und Wohngebäuden Bauabgang von Wohnungen und Wohngebäuden Lange Reihen ab 1969 - 2018*, 2019.

- [52] destatis, Statistisches Bundesamt: *Anteil unbewohnter Wohnungen nach Bundesländern*, 2020. <https://www.destatis.de/DE/Themen/Gesellschaft-Umwelt/Wohnen/Tabellen/unbewohnte-wohnungen-nach-bundeslaendern.html>.
- [53] destatis, Statistisches Bundesamt: *Bevölkerung nach Gebietsstand*, 2020. <https://www.destatis.de/DE/Themen/Gesellschaft-Umwelt/Bevoelkerung/Bevoelkerungsstand/Tabellen/liste-gebietstand.html>.
- [54] destatis, Statistisches Bundesamt: *Baupreisindex (Bauarbeiten Hochbau einschließlich Umsatzsteuer; 61261-002)*, 2021.
- [55] destatis, Statistisches Bundesamt: *Bevölkerung und Erwerbstätigkeit - Wanderungen*, 2021.
- [56] destatis, Statistisches Bundesamt: *Baupreisindex (Bauarbeiten Hochbau einschließlich Umsatzsteuer; 61261-002)*, 2022.
- [57] destatis, Statistisches Bundesamt: *Daten zur Energiepreisentwicklung - Lange Reihe*, 2022.
- [58] Diefenbach, Nikolaus *et al.*: *Datenbasis Gebäudebestand – Datenerhebung zur energetischen Qualität und zu den Modernisierungstrends im Wohngebäudebestand*. IWU: Darmstadt, 2010.
- [59] Diefenbach, Nikolaus *et al.*: *Application of Building Typologies for Modelling the Energy Balance of the Residential Building Stock*. Seiten 1–72, 2012.
- [60] Diefenbach, Nikolaus *et al.*: *Maßnahmen zur Umsetzung der Ziele des Energiekonzepts im Gebäudebereich - Zielerreichungsszenario*. BMVBS, Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung, 2013.
- [61] Diefenbach, Nikolaus, Loga, Tobias und Stein, Britta: *Szenarienanalysen und Monitoringkonzepte im Hinblick auf die langfristigen Klimaschutzziele im deutschen Wohngebäudebestand: Bericht im Rahmen des europäischen Projekts EPISCOPE*. Institut Wohnen und Umwelt, 2015.
- [62] DiPasquale, Denise und Wheaton, William C: *The markets for real estate assets and space: A conceptual framework*. Real Estate Economics, 20(2):181–198, 1992.

- [63] Discher, Henning *et al.*: *dena-Sanierungsstudie. Teil 1: Wirtschaftlichkeit energetischer Modernisierung im Mietwohnungsbestand. Begleitforschung zum dena-Projekt „Niedrigenergiehaus im Bestand“*, 2010.
- [64] Dunkelberg, Elisa, Weiß, Julika und Hirschl, Bernd: *Wärmewende in Städten gestalten. Empfehlungen für eine sozial-ökologische Transformation der Wärmeversorgung am Beispiel von Berlin, Urbane Wärmewende*. Berlin, 2020.
- [65] DWD, Deutscher Wetterdienst (Hrsg.): *Klimafaktoren für den Energieausweis*, 2020.
- [66] EU-Kommission: *Fahrplan für ein ressourcenschonendes Europa*. COM(2011)571, 2011.
- [67] Faulstich, Martin *et al.*: *Impulse für eine integrative Umweltpolitik - Umweltgutachten*, 2016.
- [68] Forster-Kraus, Stefanie: *Der Einfluss der Demographie auf die Erschwinglichkeit von Wohnraum in Deutschland: eine theoretische und empirische Analyse*, Band 60. Immobilien-Manager-Verl., 2011.
- [69] Fraunhofer ISE: *Energy-Charts*, 2021.
https://energy-charts.info/charts/climate_annual_average/chart.htm?l=de&c=DE&source=air_color zuletzt aufgerufen 04/2021.
- [70] Gossen, Maïke und Nischan, Carolin: *Regionale Differenzen in der Wahrnehmung energetischer Sanierungen*. Ergebnisse einer qualitativen Befragung von privaten GebäudeeigentümerInnen zu energetischer Sanierung in zwei unterschiedlichen Regionen. Berlin, 2014.
- [71] Großklos, Marc: *Warum sind sie denn so verschieden - Energiebedarf und tatsächlicher Verbrauch-Abgleich zwischen Theorie und Praxis*. Tagungsband 7. Internationaler Holz(Bau)Physik-Kongress, Seiten 33–35, 2016.
- [72] Gruber, Edelgard *et al.*: *Energiepass für Gebäude: Evaluation des Feldversuchs*. Schlussbericht an die Deutsche Energieagentur (dena) Berlin, Karlsruhe/Stuttgart/Darmstadt, 2005.
- [73] Harthan, Ralph O. *et al.*: *Abschätzung der Treibhausgasminderungswirkung des Klimaschutzprogramms 2030 der Bundesregierung*. Teilbericht des Projektes „THG-Projektion:

- Weiterentwicklung der Methoden und Umsetzung der EU-Effort Sharing Decision im Projektionsbericht, 2019.
- [74] Hecking, Harald, Hennes, Oliver, Elberg, Christina, Oschatz, Bert Oschatz, Winiewska, Bernadetta, Mailach, Bettina, Holm, Andreas und Kagerer, Florian: *Gebäudestudie - Szenarien für eine marktwirtschaftliche Klima- und Ressourcenschutzpolitik 2050 im Gebäudesektor*. Deutsche Energie-Agentur GmbH (dena), Berlin, 2017.
- [75] Henger, Ralph *et al.*: *Modellversuch Flächenzertifikatehandel - realitätsnahes Planspiel zur Erprobung eines Überregionalen Handelssystems mit Flächenausweisungszertifikaten für eine begrenzte Anzahl ausgewählter Kommunen*. Umweltbundesamt, UBA, Dessau-Roßlau, 2019.
- [76] Henger, Ralph und Voigtländer, Michael: *Energetische Modernisierung des Gebäudebestandes: Herausforderungen für private Eigentümer*. Studie im Auftrag von Haus & Grund Deutschland, Köln, 2012.
- [77] Hertle, Hans *et al.*: *Verbrauchs- oder Bedarfspass? Anforderungen an den Energiepass für Wohngebäude aus Sicht privater Käufer und Mieter*. ifeu, 2005.
- [78] Hesse, Tilman *et al.*: *Sektorale Emissionspfade in Deutschland bis 2050–Gebäudesektor und Stromverbrauch Privathaushalte*. Berlin: Öko-Institut eV, Fraunhofer ISI, 2016.
- [79] Hinz, Eberhard: *Kosten energierelevanter Bau- und Anlagenteile bei der energetischen Modernisierung von Altbauten*. IWU: Darmstadt, 2015.
- [80] Hofe, Moritz vom: *Energetische Sanierung von Einfamilienhäusern: Drei Essays über Motive, Entscheidungsprozesse und Aktivierungsmöglichkeiten im Kontext von Privateigentum*. Dissertation, 2018.
- [81] Holm, Andreas, Mayer, Christine und Sprengard, Christoph: *Wirtschaftlichkeit von wärmedämmenden Maßnahmen*. Forschungsinstitut für Wärmeschutz. Gräfelfing (FIW Bericht, FO-2015/02), 2015.
- [82] Holm, Andreas H, Stolte, Christian und Oschatz, Bert: *Necessary changes in the residential building sector to achieve the climate protection aims for 2030/2050: Notwendige Veränderungen im Wohngebäudesektor zum Erreichen der Klimaschutzziele 2030/2050*. Mauerwerk, 22(4):225–237, 2018.

- [83] Hornberg, Claudia *et al.*: *Wasserstoff im Klimaschutz: Klasse statt Masse*. Sachverständigenrat für Umweltfragen (SRU), 2021.
- [84] Illge, Lydia und Krauß, Norbert: *Energiespareffekte und Kosten-Nutzen-Relationen der energetischen Gebäudesanierung*. 2022.
- [85] Islam, Hamidul *et al.*: *Life cycle assessment and life cycle cost implications for roofing and floor designs in residential buildings*. *Energy and Buildings*, 104:250–263, 2015.
- [86] IWU, Institut Wohnen und Umwelt GmbH (Hrsg.): *Deutsche Gebäudetypologie - Systematik und Datensätze*, 2005.
- [87] IWU, Institut Wohnen und Umwelt GmbH (Hrsg.): *TABULA Webtool*, 2017.
<http://webtool.building-typology.eu> zuletzt aufgerufen 2020.
- [88] Jering, Almut *et al.*: *Reduzierung der Flächeninanspruchnahme durch Siedlung und Verkehr*. Materialienband. Berlin. UBA-Texte, 90:2003, 2003.
- [89] Joas, Fabian *et al.*: *Die Ziele der Energiewende: Eine Kartierung der Prioritäten*. ifo Schnelldienst, 67(09):6–11, 2014.
- [90] Jochum, Patrick *et al.*: *Dämmbarkeit des deutschen Gebäudebestands*. Berlin, 2015.
- [91] Johann, Sebastian und Kurzrock, Björn Martin: *Effiziente Entwicklung von Revitalisierungskonzepten am Beispiel von Mehrfamilienhäusern aus den 1970er Jahren*. *Bauingenieur*, 06:2018:223–232, 2018.
- [92] Just, Tobias: *3 Demografie und Wohnimmobilien*, Seiten 45–127. Oldenbourg Wissenschaftsverlag, München, 2013, ISBN 9783486719154. <https://doi.org/10.1524/9783486719154>. 45.
- [93] Kenkmann, Tanja *et al.*: *Flächensparend Wohnen – Energieeinsparung durch Suffizienzpolitiken im Handlungsfeld Wohnfläche*. Umweltbundesamt, UBA, Dessau-Roßlau, 2019.
- [94] KfW: *Das KfW-Effizienzhaus*, 2020. <https://www.kfw.de/inlandsfoerderung/Privatpersonen/Bestandsimmobilie/Energieeffizient-Sanieren/Das-KfW-Effizienzhaus/>.

- [95] Kranzl, Lukas *et al.*: *Renewable heating: Perspectives and the impact of policy instruments*. Energy Policy, 59:44–58, 2013.
- [96] Kurzrock, Björn Martin und Wasser, Nils Magnus: *Anreize für energetische Modernisierungen im Gebäudesektor*. gif Policy Paper 1/2018.
- [97] Laurent, Marie Hélène *et al.*: *Back to reality: How domestic energy efficiency policies in four European countries can be improved by using empirical data instead of normative calculation*. Seiten 2057–2070. European Council for an Energy Efficient Economy (ECEEE), 2013.
- [98] Lennerts, Kunibert *et al.*: *Verantwortung übernehmen - Der Gebäudebereich auf dem Weg zur Klimaneutralität*. KIT, 2021.
- [99] Loga, Tobias, Stein, Britta, Diefenbach, Nikolaus und Born, Rolf: *Deutsche gebäudetyologie: Beispielhafte Maßnahmen zur Verbesserung der Energieeffizienz von typischen Wohngebäuden. Zweite erweiterte Auflage*. 2015.
- [100] März, Steven: *Warum sollte ich meine Mietimmobilie energetisch sanieren?: Analyse und Multi-Level-Governance quartiersbezogener und individueller Rahmenbedingungen zur Steigerung der energetischen Sanierungstätigkeit privater Kleinvermieter*. 2019.
- [101] McKenna, Russell *et al.*: *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, 2013.
- [102] Metzger, Sebastian *et al.*: *Wohnen und Sanieren - Empirische Wohngebäudedaten seit 2002*. Umweltbundesamt, UBA, Dessau-Roßlau, 2019.
- [103] Michelsen, Claus: *Wärmemonitor 2015: mit der Erfahrung kommt der Sanierungserfolg*. DIW Wochenbericht, 83(39):880–890, 2016.
- [104] Müller, Andreas: *Stochastic building simulation*. Vienna University of Technology. Vienna. Available online at http://www.marshallplan.at/images/papers_scholarship/2012/Mueller.pdf, 2012.
- [105] Müller, Andreas *et al.*: *Heizen 2050: Systeme zur Wärmebereitstellung und Raumklimatisierung im österreichischen Gebäudebestand: Technologische Anforderungen bis zum Jahr 2050*. Gefördert vom Klima- und Energiefonds, 2010.

- [106] Neuhoff, Karsten, Amecke, Hermann, Stelmakh, Kateryna, Rosenberg, Anja und Novikova, Aleksandra: *Erfüllung der Ziele des Energiekonzepts für Wohngebäudesanierungen: Wirtschaftlichkeit, finanzielle Unterstützung und eingesparte Energie*. CPI Brief, Climate Policy Initiative, Berlin, 2011. <http://hdl.handle.net/10419/65880>.
- [107] Renz, Ina und Hacke, Ulrike: *Einflussfaktoren auf die Sanierung im deutschen Wohngebäudebestand. Ergebnisse einer qualitativen Studie zu Sanierungsanreizen und -hemmnissen privater und institutioneller Eigentümer*. Darmstadt: IWU, 2016.
- [108] Repenning, Julia et al.: *Projektionsbericht 2021 für Deutschland*. Technischer Bericht, 2021. https://www.oeko.de/fileadmin/oekodoc/projektionsbericht_2021_bf.pdf.
- [109] Ritter, Frank: *Lebensdauer von Bauteilen und Bauelementen-Modellierung und praxisnahe Prognose*, Band 22. TU Darmstadt, 2011.
- [110] Shahi, Sheida, Esfahani, Mansour Esnaashary, Bachmann, Chris und Haas, Carl: *A definition framework for building adaptation projects*. Sustainable cities and society, 63:102345, 2020.
- [111] Stadler, Michael et al.: *Policy strategies and paths to promote sustainable energy systems—the dynamic Invert simulation tool*. Energy policy, 35(1):597–608, 2007.
- [112] Statista: *Jährlich neu installierte Kollektorfläche von Solarthermieanlagen in Deutschland in den Jahren 2000 bis 2020*, 2021. <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/13630/umfrage/neuinstallation-von-solarthermie-anlagen-seit-1999/>.
- [113] Steinbach, Jan: *Modellbasierte Untersuchung von Politikinstrumenten zur Förderung erneuerbarer Energien und Energieeffizienz im Gebäudebereich*. Fraunhofer Verlag Stuttgart, Germany, 2015.
- [114] Stengel, Julian: *Akteursbasierte Simulation der energetischen Modernisierung des Wohngebäudebestands in Deutschland*. Dissertation, 2014.
- [115] Sterchele, Philip et al.: *Wege zu einem klimaneutralen Energiesystem. Die deutsche Energiewende im Kontext gesellschaftlicher Verhaltensweisen*. 2020.
- [116] Stieß, Immanuel und Dunkelberg, Elisa: *Objectives, barriers and occasions for energy efficient refurbishment by private homeowners*. Journal of Cleaner Production, 48:250–259, 2013.

- [117] Stieß, Immanuel *et al.*: *Handlungsmotive,-hemmnisse und Zielgruppen für eine energetische Gebäudesanierung*. Ergebnisse einer standardisierten Befragung von Eigenheimsanierern. Frankfurt am Main, 2010.
- [118] Stolte, Christian, Marcinek, Heike, Discher, Henning, Hinz, Eberhard und Enseling, Andreas: *dena-Sanierungsstudie. Teil 2: Wirtschaftlichkeit energetischer Modernisierung in selbstgenutzten Wohngebäuden*. Begleitforschung zum dena-Projekt „Niedrigenergiehaus im Bestand, 2012.
- [119] Streicher, Kai Nino *et al.*: *Cost-effectiveness of large-scale deep energy retrofit packages for residential buildings under different economic assessment approaches*. Energy and Buildings, 215:109870, 2020.
- [120] Swan, Lukas G. und Ugursal, V. Ismet: *Modeling of end-use energy consumption in the residential sector: A review of modeling techniques*. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 13(8):1819–1835, 2009.
- [121] Thamling, Nils, Pehnt, Martin und Kirchner, Joachim: *Hintergrundpapier zur Energieeffizienzstrategie Gebäude*. IWU, ifeu, PROGNOSE, Berlin, Heidelberg, Darmstadt, Seite 131, 2015.
- [122] Thamling, Nils und Rau, Dominik: *Hintergrundpapier zur Gebäudestrategie Klimaneutralität 2045 Gutachten im Auftrag des Bundesministeriums für Wirtschaft und Klimaschutz*. IWU, ifeu, PROGNOSE, Berlin, Heidelberg, Darmstadt, 2023.
- [123] UBA, Umweltbundesamt (Hrsg.): *Kohlendioxid-Emissionen im Bedarfsfeld „Wohnen“*, 2020.
<https://www.umweltbundesamt.de/daten/private-haushalte-konsum/wohnen/kohlendioxid-emissionen-im-bedarfsfeld-wohnen> zuletzt aufgerufen 2021.
- [124] Walberg, Dietmar *et al.*: *Wohnungsbau in Deutschland-Modernisierung oder Bestandersatz*. ARGE Arbeitsgemeinschaft für zeitgemäßes Bauen eV, 2011.
- [125] Weber, Ines: *Entwicklung des individuellen Wohnflächenkonsums zwischen 1978 und 2013: Determinanten und Transformationspotenzial*. Raumforschung und Raumordnung/Spatial Research and Planning, 78(3):267–287, 2020.

- [126] Weeber, Rotraut *et al.*: *Evaluierung ausgestellter Energieausweise für Wohngebäude nach ENEC 2007. BMVBS-Online-Publikation 01/2011*, 2011.
- [127] Weiß, Julika *et al.*: *Entscheidungskontexte bei der energetischen Sanierung*. Institut für ökologisches Wirtschaftsforschung, Berlin, 2018.
- [128] Weiß, Julika und Pfeifer, Lena: *Energetische Sanierungen in Wohnungseigentümer-Gemeinschaften*. 2020.
- [129] ZIA, Zentraler Immobilien Ausschuss e.V. (Hrsg.): *Bilanzierungsgrenzen und Key Performance Indicators (KPIs) für Sanierungsfahrpläne (Positionspapier)*, 2021.
<https://zia-deutschland.de/wp-content/uploads/2021/09/2021-07-23-ZIA-Positionspapier-Bilanzierungsgrenzen-und-Key-Performance-Indicators-KPIs-fuer-Sanierungsfahrplaene.pdf> zuletzt aufgerufen 2023.
- [130] Zimmermann, Josef und Reiser, Maximilian: *Prognose des Verbrauchs grauer Energie über die Lebensdauer von Gebäuden*. Mauerwerk, 25(3):120–130, 2021.

Lebenslauf

Persönliche Daten

Name: Dennis Aldenhoff

Staatsangehörigkeit: Deutsch

Beruflicher Werdegang

Seit 01/2017:

Wissenschaftlicher Mitarbeiter am Fachgebiet Immobilienökonomie der RPTU Kaiserslautern-Landau

Seit 04/2023:

Geschäftsführender Gesellschafter der AdvisoRE GmbH

02/2006 - 11/2015:

Werkstudent/Teamleiter Nivellement Bergbauschäden an Gebäuden für die Cavity GmbH

11/2012 - 02/2013:

Praktikant in der Forschung & Entwicklung der PlanET Biogastechnik GmbH

08/2007 - 04/2008:

Zivildienst im Technischen Service (Haustechnik) bei der St. Josef Krankenhaus GmbH Moers

Ausbildung

2013-2016:

M.Sc. Energietechnik (Vertiefung regenerative Energietechniken) an der RWTH Aachen

2008-2013:

B.Sc. Maschinenbau (Vertiefung Energietechnik) an der RWTH Aachen