

DiffusionEE – Arbeitspaket 5: Modellierung der Entwicklung des Gebäudewärmebedarfs und der Diffusion erneuerbarer Wärmeversorgungs-technologien

AP5 des Projekts „DiffusionEE“ – Modellierung individueller Entscheidungsprozesse und des individuellen Einflusses von Intermediären bei der Diffusion von Energieeffizienzmaßnahmen und Erneuerbaren Energien im Gebäudebereich

FKZ 03ET4045A, Laufzeit 01.12.2016 bis 31.05.2020

Gefördert durch:



aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

Impressum

DiffusionEE – Arbeitspaket 5: Modellierung der Entwicklung des Gebäudewärmebedarfs und der Diffusion erneuerbarer Wärmeversorgungstechnologien

Projektleitung

Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung ISI

Breslauer Straße 48, 76139 Karlsruhe

Elisabeth Dütschke, elisabeth.duetschke@isi.fraunhofer.de

Autor

IREES Institut für Ressourceneffizienz und Energiestrategien

Schönfeldstraße 8, 76131 Karlsruhe

Jan Steinbach, j.steinbach@irees.de

Beteiligte Institute

Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung ISI (Projektleitung)

Breslauer Straße 48, 76139 Karlsruhe

Im Unterauftrag:

IREES Institut für Ressourceneffizienz und Energiestrategien, Karlsruhe

IFAK Institut GmbH & Co. KG Institut für Markt- und Sozialforschung, Taunusstein

Fördermittelgeber

Projektträger Jülich für das Bundesministerium für Wirtschaft und Energie

Zitierempfehlung

Steinbach, J. (2020): DiffusionEE – Arbeitspaket 5: Modellierung der Entwicklung des Gebäudewärmebedarfs und der Diffusion erneuerbarer Wärmeversorgungstechnologien. AP5 des Projekts „DiffusionEE“ – Modellierung individueller Entscheidungsprozesse und des individuellen Einflusses von Intermediären bei der Diffusion von Energieeffizienzmaßnahmen und Erneuerbaren Energien im Gebäudebereich. FKZ 03ET4045A. Karlsruhe: Fraunhofer ISI.

Veröffentlicht

November 2020

Hinweise

Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autorinnen und Autoren.

Dieser Bericht einschließlich aller seiner Teile ist urheberrechtlich geschützt. Die Informationen wurden nach bestem Wissen und Gewissen unter Beachtung der Grundsätze guter wissenschaftlicher Praxis zusammengestellt. Die Autorinnen und Autoren gehen davon aus, dass die Angaben in diesem Bericht korrekt, vollständig und aktuell sind, übernehmen jedoch für etwaige Fehler, ausdrücklich oder implizit, keine Gewähr. Die Darstellungen in diesem Dokument spiegeln nicht notwendigerweise die Meinung des Fördermittelgebers wider.

Inhaltsverzeichnis

1	Zielsetzung und Ausgangslage	5
1.1	Zielsetzung und Struktur des Berichts.....	5
1.2	Ausgangslage.....	5
2	Abbildung des Gebäudebestands, der Technologien und der Entscheider im Modell	7
2.1	Methodisches Vorgehen zur Abbildung des Gebäudebestandes	7
2.2	Aufbau einer Referenzgebäudestruktur für die Modellierung.....	7
2.3	Struktur der Entscheider.....	9
2.4	Wärmeversorgungstechnologien und Effizienzmaßnahmen	11
2.5	Energieeffizienzmaßnahmen an der Gebäudehülle	13
2.6	Modellierung des Wärmebedarfs im Startjahr und Abgleich mit der Energiebilanz	14
3	Modellierung der Investitionsentscheidung und Integration der empirischen Ergebnisse	16
3.1	Prozess der empirische Modellbildung für die Energiesystemmodellierung.....	16
3.2	Modellierung der Aktivitätsraten mit Bezug zu den empirischen Erkenntnissen	17
3.3	Integration der empirischen Ergebnisse in der Modellierung der Investitionsentscheidung	18
3.3.1	Ablauf der Investitionsentscheidung im Modell	19
3.3.2	Operationalisierung der Entscheidungsparameter im Modell	20
3.3.3	Modellierung der Marktanteile.....	24
3.4	Modellierung der Einflüsse und Marktbeschränkungen.....	26
4	Szenarienmodellierung und Ergebnisse	28
4.1	Definition der Szenarien.....	28
4.2	Allgemeine Rahmendaten für die Szenarien.....	30
4.2.1	Energiepreis	30
4.2.2	Energie- und klimapolitische Instrumente	31
4.3	Szenario Cost-Sensitive-Entscheider Agent.....	34
4.4	Szenario Source-Sensitive-Entscheider Agent.....	40
4.5	Vergleichsszenario Rationaler-Entscheider-Agent	46
4.6	Vergleichsszenario Instandsetzer-Entscheider-Agent	50
4.7	Szenarien mit Marktrestriktionen	54
5	Zusammenfassung	57

6	Abbildungsverzeichnis	58
7	Tabellenverzeichnis	60
8	Literaturverzeichnis	61
9	Anhang	63
9.1	Nichtwohngebäude Effizienzmaßnahmen Entscheidung.....	63

1 Zielsetzung und Ausgangslage

1.1 Zielsetzung und Struktur des Berichts

Ziel des im Rahmen von AP6 durchgeführten Arbeiten ist es, das angewendete Energiesystemmodell mit den Erkenntnissen aus dem interdisziplinären Austausch weiterzuentwickeln. Die Erkenntnisse zu Wirkungszusammenhängen der Akteure im Gebäudebereich im Modell zu Operationalisierung und für Modellierung zu parametrisieren. Neben den Erkenntnissen zu den Akteuren sollen der Gebäudebestand und die installierten Wärmeversorgungstechnologien detailliert abgebildet werden. Darauf aufbauend sollen Szenarien entwickelt werden, die den Wärmebedarf in Gebäuden in Deutschland bis zum Jahr 2050 modellieren.

Der folgende Bericht stellt zunächst das Vorgehen zur Abbildung der Gebäudebestände und der Gliederung der Entscheider im Gebäudebereich dar. Kapitel 3 beschreibt die Methodik zur Modellierung der Investitionsentscheidung und die Integration der im Rahmen dieses Projektes erhobenen empirischen Ergebnisse. Kapitel 4 beschreibt den Szenarienaufbau und diskutiert die Ergebnisse.

1.2 Ausgangslage

Für die Modellierung wird das Modell Invert/ee-lab und Invert-Agents eingesetzt und im Rahmen des Projektes angepasst und mit den Ergebnissen der empirischen Untersuchung parametrisiert.

Methodisch stellt Invert/EE-Lab ein dem Bottom-up-Ansatz folgendes, techno-ökonomisches Simulationsmodell dar, mit dem Optionen des Energiebedarfs und dessen Deckung für Wärme (Raumwärme und Warmwasser) sowie Klimatisierung von Wohn- und Nichtwohngebäuden ermittelt und die Auswirkungen verschiedener Förderinstrumente in Jahresschritten abgebildet werden können (Abbildung 1). Mit dem Modell kann der Gebäudebestand detailliert nach Gebäudetypen, Baualterklassen und Sanierungszuständen mit relevanten bauphysikalischen und ökonomischen Parametern einschließlich der Technologien zur Bereitstellung von Raumwärme, Warmwasser und Klimatisierung abgebildet werden. Darauf aufbauend wird der Heiz- und Kühlenergiebedarf unter Einbeziehung von Nutzerverhalten und Klimadaten ermittelt.

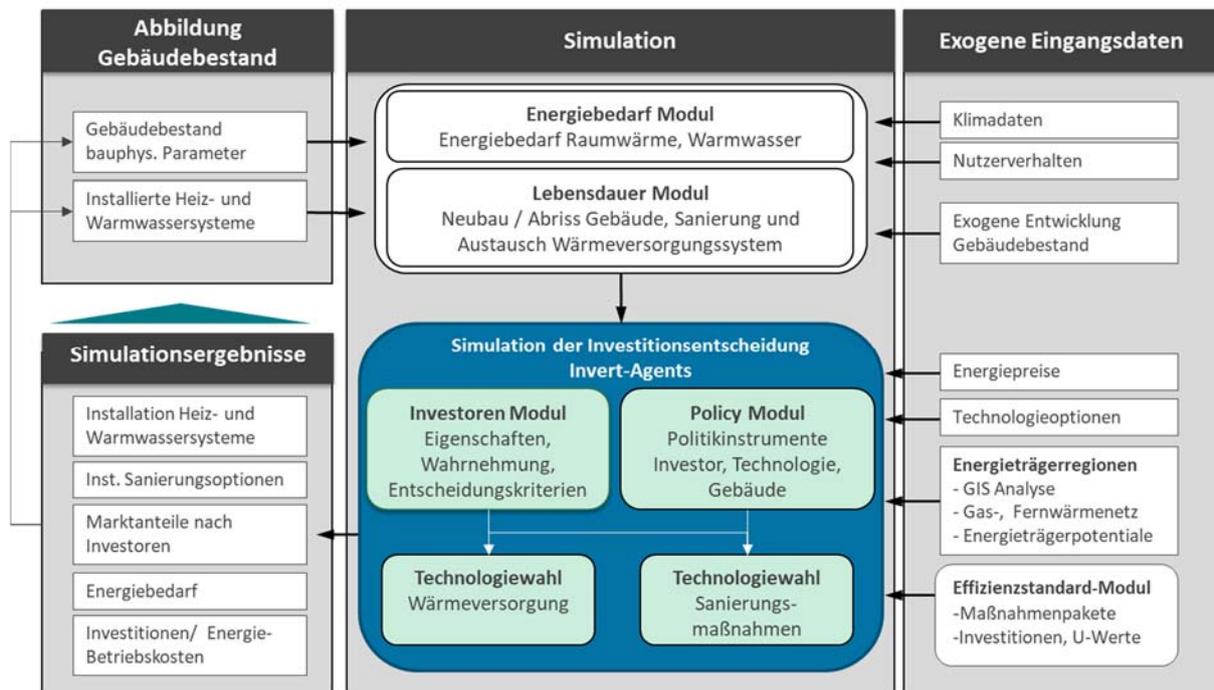


Abbildung 1: Struktur des Simulationsmodells Invert/ee-lab

Quelle: (Steinbach, 2015)

Die Investitionsentscheidung in Technologien und Effizienzmaßnahmen wird unter Berücksichtigung von investorenspezifischen Entscheidungskalkülen und Hemmnissen sowie Energieträgerpotentialen im Modul INVERT-Agents ermittelt (vgl. Steinbach 2015). Mit INVERT/EE-Lab ist es möglich, die Auswirkung unterschiedlicher Politikinstrumente und Ausgestaltungsvarianten auf den Ausbau der Erneuerbaren Energien im Gebäudebereich in Szenarien zu analysieren.

2 Abbildung des Gebäudebestands, der Technologien und der Entscheider im Modell

2.1 Methodisches Vorgehen zur Abbildung des Gebäudebestandes

Neben den empirischen Daten zu dem Entscheidungsverhalten, die in AP2 bis AP4 gewonnen werden, werden empirische Daten zum Gebäudebestand mit Bezug auf den bauphysikalischen Zustand der einzelnen Gebäude, den installierten Wärmeversorgungstechnologien und den Eigentumsformen zusammengeführt und in das Modell überführt. Ziel ist es, den Gebäudebestand disaggregiert sowohl mit Bezug auf die techno-ökonomischen Daten der Gebäude und Technologien als auch hinsichtlich der entscheidungsrelevanten Parameter der Gebäudeeigentümer (Entscheider-Agenten) abzubilden. Dazu werden unterschiedliche Quellen zusammengeführt und ausgewertet, um den Gebäudebestand in Referenzgebäudesegmenten abzubilden und für das Jahr 2018 als Basisjahr der Modellierung mit der Energiebilanz zu kalibrieren. Die Erkenntnisse aus AP2 bis AP4 zu dem Entscheidungsverhalten der Akteure wird entsprechend den statisch erfassten Strukturen der Eigentümer zugewiesen.

2.2 Aufbau einer Referenzgebäudestruktur für die Modellierung

Datengrundlage zur Abbildung des Wohngebäudebestandes stellen insbesondere die Daten aus der Mikrozensus Zusatzerhebung *Wohnen in Deutschland 2018* (Statische Ämter des Bundes und der Länder, 2019), die Studie *Datenerhebung Wohngebäudebestand* (Cischinsky & Diefenbach, 2018) und Abfragen zusätzlicher Daten aus der mit dieser Studie verbundenen Datenbank des Instituts für Wohnen und Umwelt (IWU) (Cischinsky et al., 2018) dar. Die Informationen zu den installierten Wärmeversorgungstechnologien nach Gebäudesegmenten werden ergänzt durch die Neubaustatistik für die Jahre 2016 bis 2018 (StaBuA, 2019), da der Datenbestand der IWU Studie das Jahr 2016 als Grundlage hat. Um den tatsächlichen Sanierungsstand mit den bereits nachträglich erfolgten Sanierungen abzubilden, werden die Daten mit der Studie *Datenbasis Wohngebäudebestand* (Diefenbach et al., 2010) – ebenfalls durch detaillierte Abfrage der Primärdaten – ergänzt.

Mit den Daten werden zunächst Referenzgebäudeklassen ermittelt und im Modell hinterlegt, die nach Gebäudetyp (Einfamilienhaus, Reihenhaushaus, Mehrfamilienhaus und Baualtersklasse) unterschieden werden (Abbildung 2).

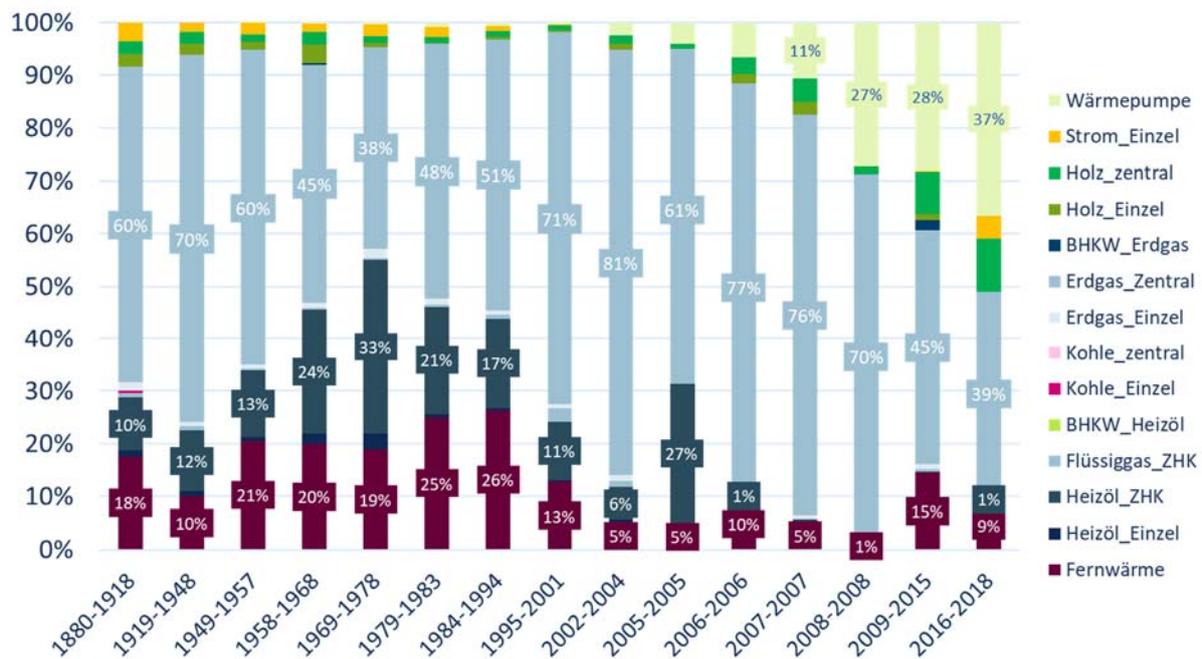


Abbildung 3: Installierte Wärmeversorgungstechnologien im Gebäudebestand in Deutschland

Quelle: Eigene Berechnung; (Cischinsky et al., 2018; StaBuA, 2019; Statische Ämter des Bundes und der Länder, 2019)

Für den Nichtwohngebäudebereich bestehen derzeit noch große Datenlücken. Auch im Rahmen der empirischen Befragung in diesem Projekt konnten keine repräsentativen Strukturdaten zu dem Nichtwohngebäudebestand und dem Segment der Büro- und Handelsgebäude gewonnen werden. Die Datengrundlage stellt insbesondere die Studie zum Energieverbrauch im Sektor GHD und die darin entwickelte Gebäudetypologie (Schloman et al., 2013) sowie die Studie Typologie und Bestand beheizter Nichtwohngebäude dar (Dirich et al., 2011). Relevante Daten aus der laufenden Studie data:NWG zur systematischen Erfassung des Nichtwohngebäudebestandes konnten nur mit Bezug auf wenige Informationen aus der Vorabveröffentlichung auf der Webseite integriert werden (Hörner et al., 2018)

Das Resultat stellt eine disaggregierte Segmentierung des Wohngebäudebestands sowie des Nichtwohngebäudebestands im Sektor GHD mit rund 9500 unterschiedlichen Referenzgebäudesegmenten mit den relevanten bauphysikalischen und technoökonomischen Eingangsdaten für die Modellierung im Basisjahr 2018 dar.

2.3 Struktur der Entscheider

Die Abbildung der Struktur der Gebäudeeigentümer als Investoren- oder Entscheider-Agenten ist zentral für die Integration der empirischen Ergebnisse zum Investitionsentscheidungsverhalten. Im Modell werden die Entscheider-Agenten mit den Referenzgebäudesegmenten verknüpft. Das Modell ermöglicht die Zuweisung der unterschiedlichen Entscheider-Typen auf Ebene der Gebäudeklassen (vgl. 2.2). Die statistische Grundlage bildet, wie bei der Gebäudestruktur, der Mikrozensus und die Erhebungen zum Gebäudebestand 2016 durch das IWU (Cischinsky et al., 2018; Statische Ämter des Bundes und der Länder, 2019). Abbildung 4 zeigt die Eigentümerstruktur nach Gebäudetyp und Baualtersklasse der Gebäude.

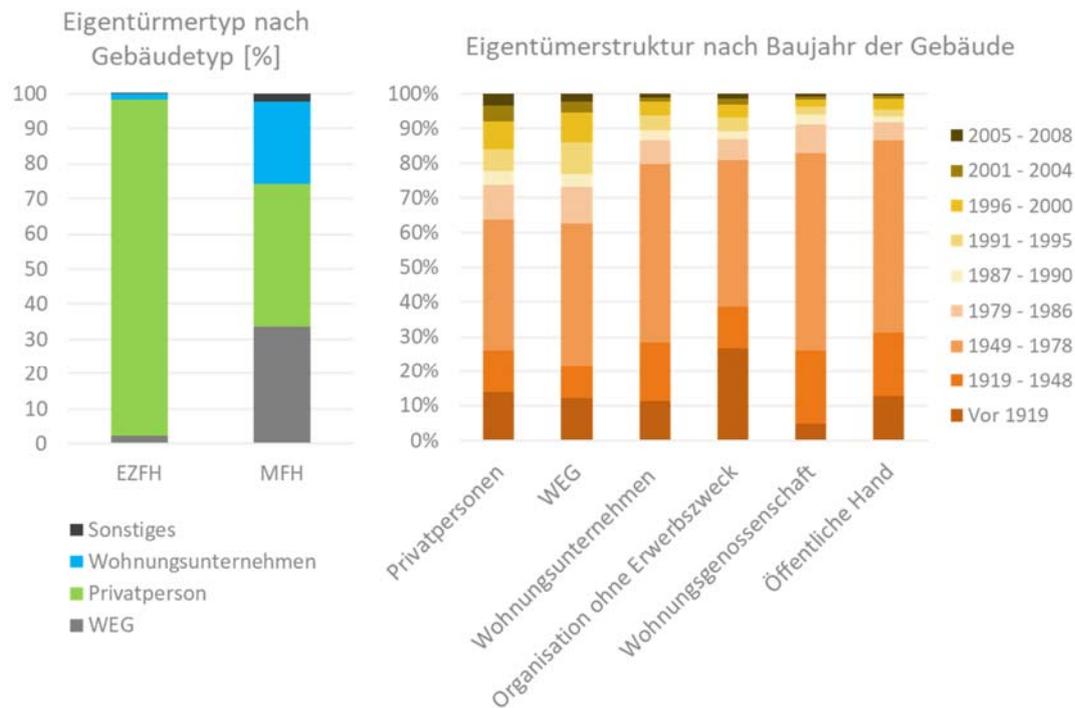


Abbildung 4: Eigentümerstruktur nach Gebäudetypen und Baujahrsklasse der Gebäude

Quelle: Eigene Darstellung nach Cischinsky et al. 2018; Statistische Ämter des Bundes und der Länder 2015

Als weitere Differenzierung werden die Daten mit dem Anteil der vermieteten und eigentümergeborenen Wohnungen kombiniert, um zwischen selbstnutzenden Eigentümern, Eigentümergeinschaften, Wohnungsgesellschaften, privaten Vermietern und Nichtwohngebäude-Eigentümern als Eigentümerklassen zu unterscheiden. Im Modell wird vorgesehen, dass pro Eigentümerklasse eine beliebige Anzahl an Entscheider-Agenten definiert werden kann, die sich aus der Clusterung der empirischen Untersuchung mit Bezug auf die unterschiedlichen Verhaltensweisen ergeben kann. Damit ist das Modell nicht an die im Rahmen dieses Forschungsvorhabens ermittelten Entscheider-Cluster gebunden, sondern kann in Zukunft auch durch Erkenntnisse weiterer Studien ergänzt werden. Tabelle 1 zeigt die für die Modellierung hinterlegten Anteile der Eigentümerklassen jeweils an den Ein- und Zweifamilienhäusern und den Mehrfamilienhäusern. Im Wohngebäudebereich werden durch die empirische Untersuchung die Investitionsverhalten der selbstnutzenden Eigentümer analysiert, die im Modell mit Bezug auf die Verhaltensweisen parametrisiert und operationalisiert werden (vgl. 3.3). Mit der detaillierten Modellierung des Investitionsentscheidungsverhaltens wird somit rund 50 % der gesamten Wohnfläche in Deutschland einbezogen. Mit Bezug auf die Nichtwohngebäude kann aufgrund der fehlenden Strukturdaten keine Differenzierung vorgenommen werden.

Tabelle 1 Anteile der Eigentümerklassen an den Gebäudekategorien im Wohngebäudebereich

	Ein- und Zweifamilienhaus	Mehrfamilienhaus
Selbstnutzende Eigentümer	82,7 %	
Private Vermieter	13,4 %	42,9 %
Eigentümergeinschaften	2,2 %	33,6 %

Wohnungsgesellschaften

1,7 %

23,5 %

Quelle: Eigene Berechnung; nach Cischinsky et al. 2018; Statistische Ämter des Bundes und der Länder 2015

2.4 Wärmeversorgungstechnologien und Effizienzmaßnahmen

Die zentralen Eingangsdaten für die Modellierung der Investitionsentscheidung und der Berechnung der Attribute der Wärmeversorgungstechnologien sind neben den jeweiligen Energiepreisen die spezifischen Investitionen und Effizienzen. Im Modell erfolgt die Kostenberechnung gebäudespezifisch, so dass die verschiedenen Technologieoptionen entsprechend der erforderlichen thermischen Leistung ausgelegt werden. Abbildung 5: Spezifische Investitionen für Wärmeversorgungssysteme bis 50 kW zeigt die berücksichtigten spezifischen Investitionen der verschiedenen Wärmeerzeuger in Abhängigkeit der Dimensionierung für den Leistungsbereich bis 30 kW_{th}.

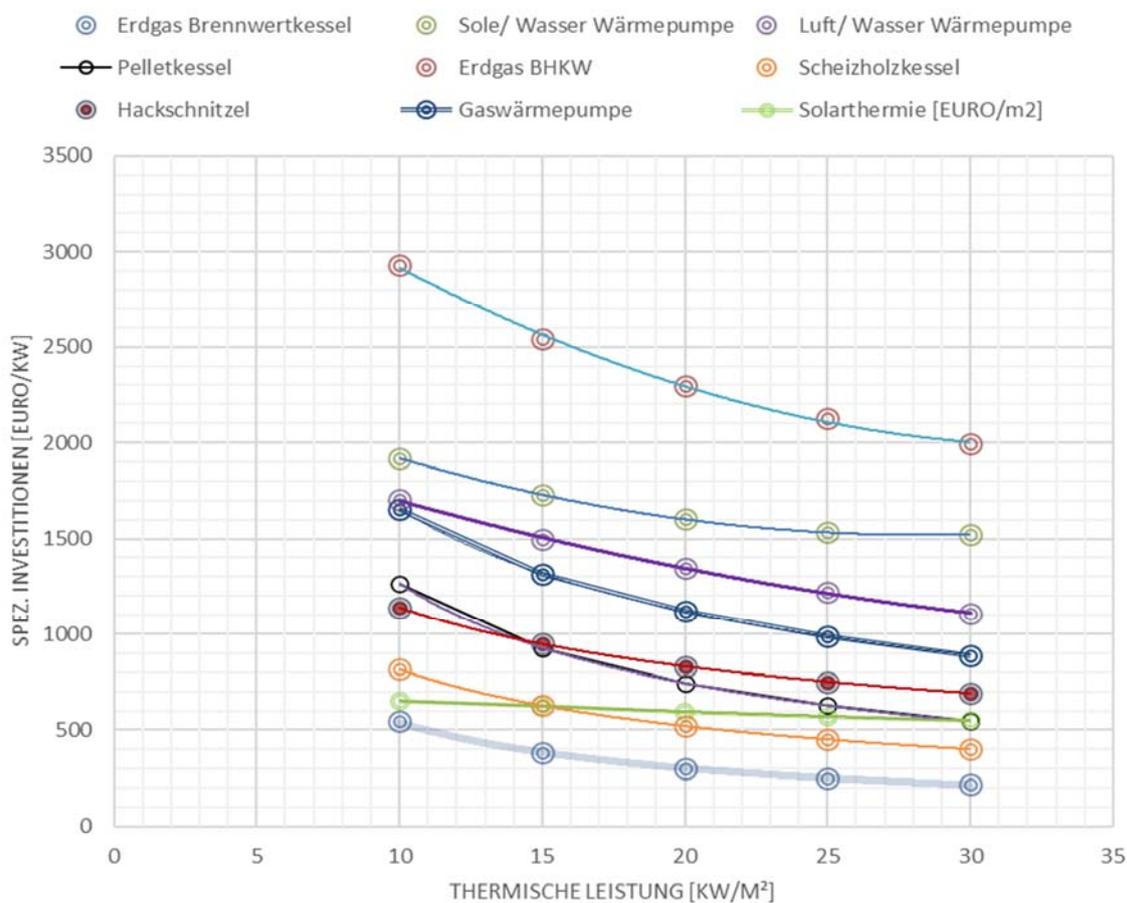


Abbildung 5: Spezifische Investitionen für Wärmeversorgungssysteme bis 50 kW

Quelle: Eigene Darstellung; (Fichtner et al., 2019; Maas & Schlitzberger, 2017); Gaswärmepumpe Eigene Recherche Hersteller

Diese beinhalten die Investitionen in Geräte, Peripherie mit thermischem Speicher und Installationskosten. Bei der Sole/Wasserwärmepumpe sind die Kosten für die Erschließung der Wärmequelle mit Bohrkosten ebenfalls enthalten. Darüber hinaus werden im Modell weitere Kosten berücksichtigt, die gegebenenfalls bei einem Energieträgerwechsel anfallen. Beispielsweise die Kosten für einen Gasanschluss,

falls vorher noch keine Gastechologie installiert war. Abbildung 6: Spezifische Investitionen für Wärmeversorgungssysteme bis 50 kW zeigt die spezifischen Investitionen für größere Wärmeversorgungssysteme im Leistungsbereich 50 bis 300 kW.

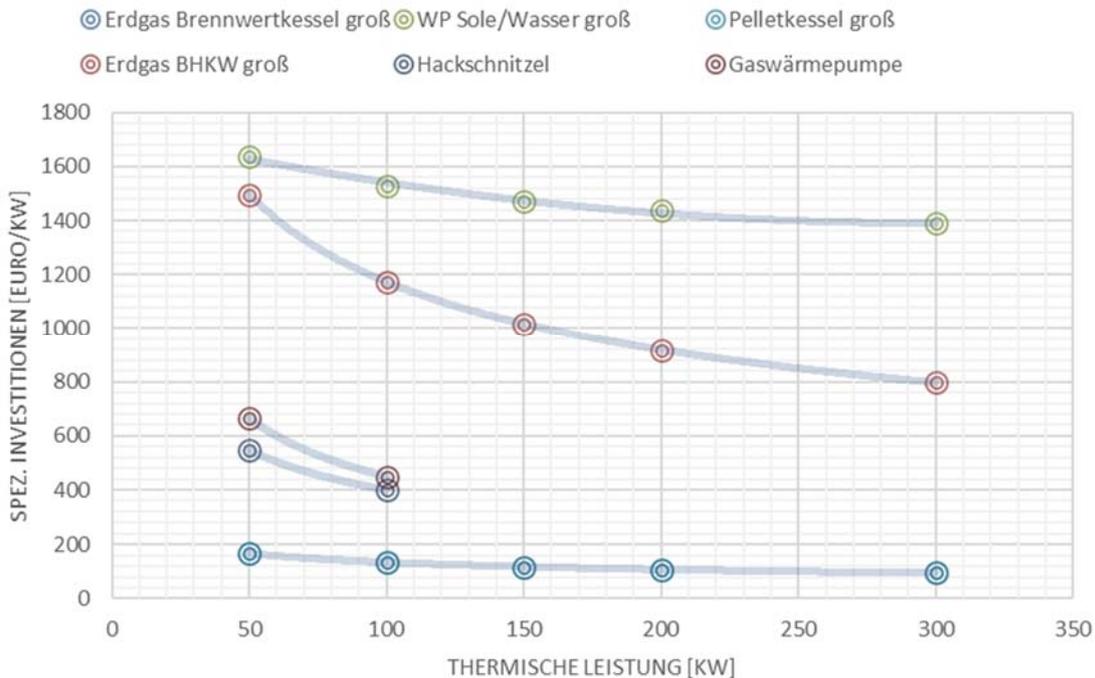


Abbildung 6: Spezifische Investitionen für Wärmeversorgungssysteme bis 50 kW

Quelle: Eigene Darstellung; (Fichtner et al., 2019; Maas & Schlitzberger, 2017); Gaswärmepumpe Eigene Recherche Hersteller

Tabelle 2 zeigt die berücksichtigten Effizienzen der Wärmeversorgungstechnologien. Im Modell wird die Effizienz der Wärmeversorgung in Abhängigkeit des Wärmeverteilsystems und der damit verbundenen Vor- und Rücklauftemperatur (VL/RL) berechnet. Das ist insbesondere für Wärmepumpensysteme relevant, für die sich daraus unterschiedliche Bewertungen in der Investitionsentscheidung in sanierten und unsanierten Gebäuden ergibt. Im Modell geht der Jahresnutzungsgrad der Technologien bei 35°C Vorlauftemperatur und die Effizienzverluste, die sich bei einer Vorlauftemperatur von 55°C ergeben ein. Höhere Temperaturen werden entsprechend linear extrapoliert. Für die Warmwassererzeugung erfolgt die Berechnung auf Basis der dargestellten Jahresnutzungsgrade separat.

Tabelle 2: Jahresnutzungsgrad der Wärmeversorgungstechnologien

Bezeichnung	Jahresnutzungsgrad bei 35 °C VL	Effizienzverluste bei 55°C VL	Jahresnutzungsgrad Warmwassererzeugung
Fernwärme	0.98	0.01	0.93
Heizöl Brennwert	0.97	0.05	0.92
Bio-Heizöl Brennwert	0.97	0.05	0.92
Erdgas Brennwert	0.99	0.05	0.88
Biogas Brennwert	0.99	0.05	0.88
BHKW Erdgas	0.91	0	0.85

Gaswärmepumpe	1.42	0.07	1.3
Holzpellets Einzel	0.84	0	0.76
Scheitholz zentral	0.85	0	0.85
Hackschnitzel zentral	0.90144	0	0.90
Holzpellet zentral	0.90144	0	0.90144
Elektrische Einzelheizgerä- te	1	0	1
Wärmepumpe Luft	4.5	0.9	3.4
Wärmepumpe Erd- reich/Grundwasser	5.1	0.85	4.3

Quelle:

2.5 Energieeffizienzmaßnahmen an der Gebäudehülle

Effizienzmaßnahmen an der Gebäudehülle werden im Modell nicht als Einzelmaßnahmen abgebildet, sondern durch Sanierungspakete, die spezifisch für jedes Referenzgebäude berechnet werden und mit denen unterschiedliche Effizienzstandards (EnEV-Standard, KfW-Standards) erreicht werden (Steinbach et al., 2016; Steinbach & Schultmann, 2015). Die zu erreichenden Standards werden jeweils über den spezifischen, auf die wärmeübertragende Gebäudefläche bezogenen, Transmissionswärmekoeffizienten (ht') definiert. Die mit den Effizienzmaßnahmenpaketen verbundenen Investitionen hängen maßgeblich vom energetischen Ausgangszustand des jeweiligen Referenzgebäudes ab. Zudem bestehen Freiheitsgrade bei der Erreichung der Standards hinsichtlich der Auswahl der zu sanierenden Gebäudekomponente (Außenwand, Dach, Keller, Fenster) und der jeweiligen Sanierungstiefe (Dicke der Dämmschicht, Fensterqualität). Die spezifischen Investitionen der Sanierungsmaßnahmen, die zur Erreichung der jeweiligen Standards erforderlich sind, werden spezifisch für jedes Referenzgebäude ermittelt und gehen als Eingangsdaten in die Modellierung ein. Abbildung 7 zeigt die Bandbreite der spezifischen Investitionen für Effizienzmaßnahmen an der Gebäudehülle für die im Modell hinterlegten Referenzgebäudeklassen bei den verschiedenen Effizienzstandards. Zudem wird ermittelt, welcher Anteil für ohnehin anfallende Investitionen bei Instandsetzung ohne energetische Maßnahmen anfällt. Datengrundlage für die Berechnung der spezifischen Investitionen stellen die von Hinz (2011) entwickelten Kostenkurven für die unterschiedlichen Gewerke dar, die im Wesentlichen auf der Primärdatenauswertung real umgesetzter Projekte basieren, die im *KfW-Programm Energieeffizient Sanieren* gefördert wurden. Da die Preisbasis der Daten das Jahr 2009 darstellt, werden die Kosten mit Baupreisindex des Statistischen Bundesamtes auf das Basisjahr 2018 umgerechnet (StaBuA, 2020)¹.

¹ Für Wohngebäude ergibt sich daraus ein Faktor von 1,23, für Bürogebäude ein Faktor von 1,24.

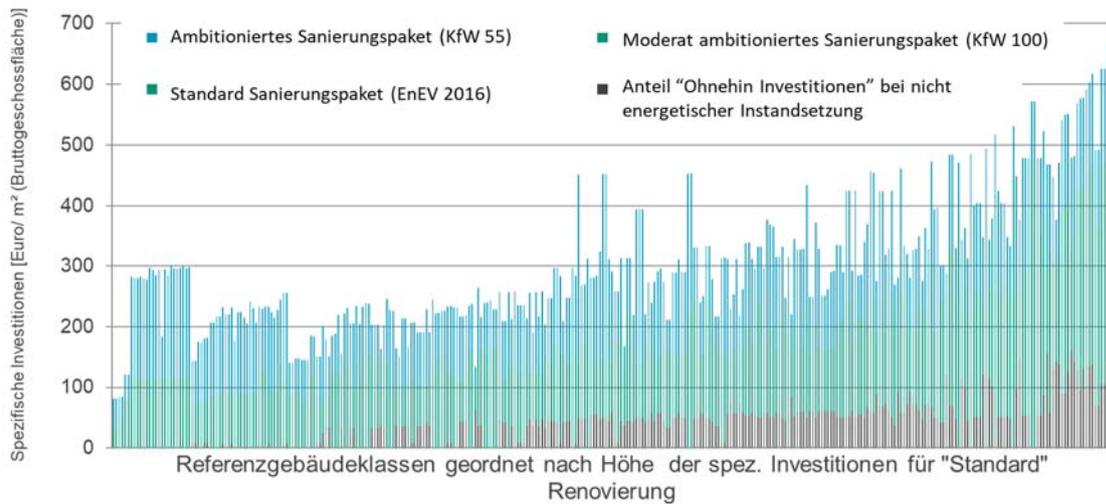


Abbildung 7: Spezifische Investitionen für Effizienzmaßnahmen differenziert nach Effizienzstandards und Referenzgebäude im Modell Invert/EE-Lab

Quelle: Eigene Berechnung

2.6 Modellierung des Wärmebedarfs im Startjahr und Abgleich mit der Energiebilanz

Mit den disaggregierten Eingangsdaten wird der Wärmebedarf für das Basisjahr 2018 berechnet und mit den realen Energieverbräuchen für die relevanten Anwendungen Raumwärme und Warmwasser entsprechend der Anwendungsbilanz der AG Energiebilanzen abgeglichen (AGEB, 2020). Dazu werden im Modell die durchschnittlichen Monatstemperaturen aus dem Jahr 2018 hinterlegt, die sich aus sechs Wetterstationen ergeben, mit denen die Temperaturunterschiede in den unterschiedlichen Klimazonen in Deutschland abgedeckt werden². Abbildung 8 zeigt die resultierenden monatlichen Temperaturen und Heiztage. Daraus ergeben sich als Maß für den temperaturabhängigen Wärmebedarf 3317 Heizgradtage für das Jahr 2018.

² Es werden die durchschnittlichen Monatstemperaturen aus den Wetterstationen Münster, Berlin-Tempelhof, Düsseldorf, Frankfurt am Main, Hamburg, Hannover, Leipzig, München, Stuttgart verwendet.

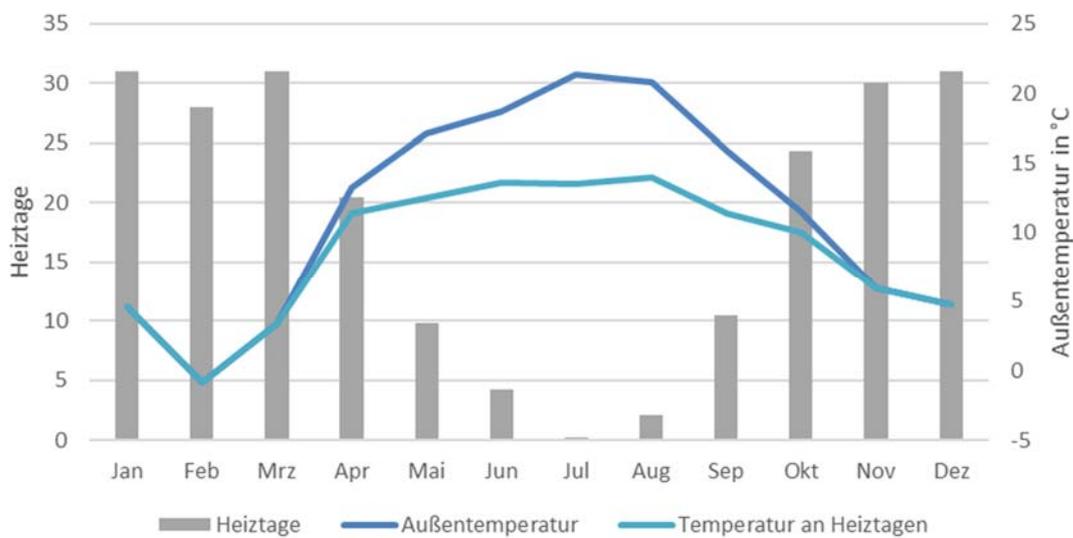


Abbildung 8: Durchschnittliche Temperatur und Heiztage aus sechs Wetterstationen in Deutschland für das Jahr 2018

Quelle: Eigene Darstellung; (IWU, 2020)

Abbildung 9 zeigt den Abgleich zwischen Modellergebnis und der Statistik, jeweils für Wohn- und Nichtwohngebäude. Die Ergebnisse zeigen, dass die bottom-up Modellierung über die Referenzgebäudesegmente den Wärmebedarf sehr genau abdeckt. Die Abweichung in der Biomassenutzung bei den Wohngebäuden ist dadurch zu erklären, dass in der Statistik auch die Zusatzeinzelraumfeuerungen wie Kaminöfen enthalten sind, die im Modell nicht abgebildet sind.

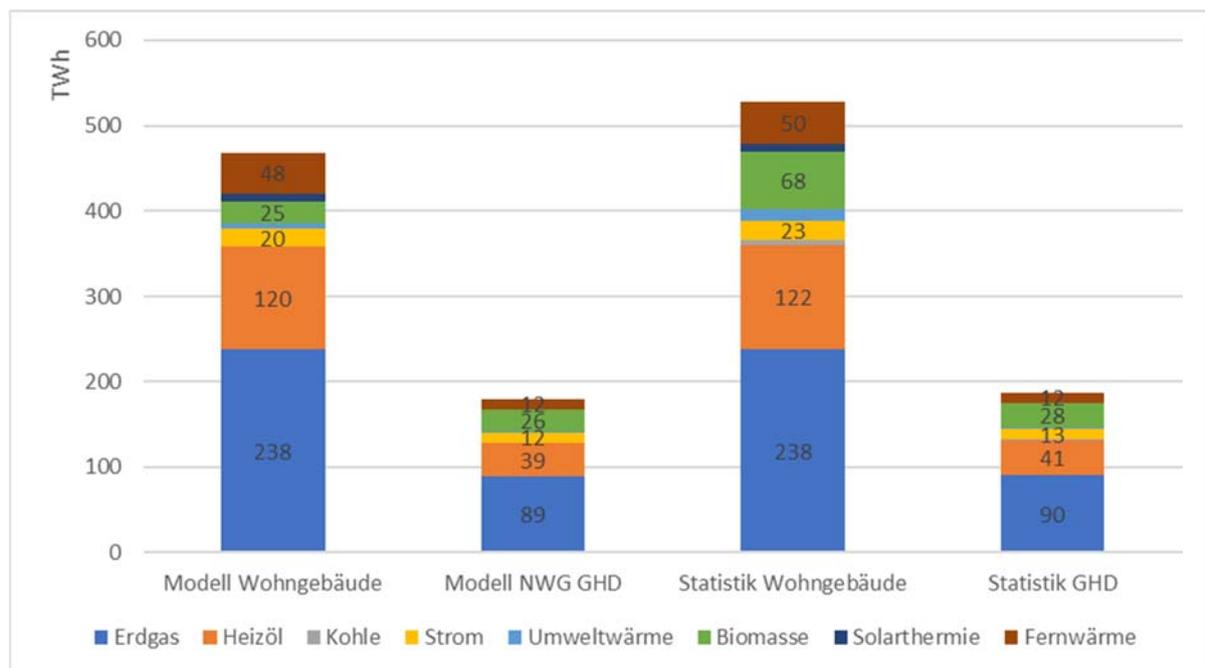


Abbildung 9: Vergleich Endenergieverbrauch Wärme Modellierung und Statistik

3 Modellierung der Investitionsentscheidung und Integration der empirischen Ergebnisse

3.1 Prozess der empirische Modellbildung für die Energiesystemmodellierung

Im Rahmen des Projektes sind verschiedene mögliche Schnittstellen zwischen empirischer Befragung und dem Modell identifiziert und konzeptionell entworfen worden. Im Arbeitspaket zum interdisziplinären Austausch haben sich daraus verschiedene methodische Herangehensweisen sowohl für das Befragungsdesign als auch das Modelldesign ergeben. Daraus ergeben sich wichtige Erkenntnisse für eine empirische Modellbildung in der Energiesystemmodellierung, die Systemzustände durch Simulationsentscheidungen einzelner Akteure ermittelt.

Für die Modellierung der Entscheidungssituation und der Investitionsentscheidung ist dabei die Quantifizierung und Operationalisierung von Parametern in den Systemgrenzen des Modells relevant. Somit reicht es nicht aus, dass qualitative Erkenntnisse und Tendenzen in Faktoren quantifiziert werden, sondern dass die Abhängigkeit dieser Faktoren sich innerhalb der Systemgrenzen des Modells abbilden lassen. Daraus ergibt sich die Notwendigkeit des interdisziplinären Austausches von Anfang an und eine Überlagerung im methodischen Vorgehen von Seiten des Befragungsdesigns einerseits (Empirie) und der Energiesystemmodellierung andererseits (Abbildung 10). Da die Erkenntnisse mit Bezug auf die relevanten Verhaltensweisen erst durch die empirische Forschung gewonnen werden, kann von Seiten der Modellierung nicht von Anfang an der Parameterraum vorgegeben werden, der bereits durch das Modell abgedeckt ist. Andererseits ergeben sich aus Sicht der Modellbildung nach vorliegenden Erkenntnissen zu Identifizierung der relevanten Akteure und deren Motivation, Tendenzen und Einflüssen durch andere, Mindestanforderungen an die Parametrisierung und Operationalisierung im Simulationsmodell.



Abbildung 10: Arbeitsschritte und Überlappung bei der empirischen Modellbildung

Quelle: Eigene Darstellung

Mit Bezug auf die durchgeführten Arbeiten im Projekt hat sich gezeigt, dass die empirischen Erkenntnisse in den ersten Befragungen wichtige Erkenntnisse für die Anlässe für eine Entscheidungssituation und die relevanten Attribute bei der Entscheidungswahl geliefert haben. Diese konnten zum großen Teil auch parametrisiert, aber nur teilweise operationalisiert werden, da diese außerhalb der Systemgrenzen des Modells liegen. Beispiele hierfür sind die Erkenntnisse zu nicht gebäude- oder eigentümerspezifischen Sanierungsanlässen. Die Erkenntnis, dass eine Geschäftsveränderung im Bereich der Nichtwohngebäude eine höhere Relevanz für die Durchführung einer Sanierung hat als die gebäudespezifischen

Schäden, kann im Modell nur generisch abgebildet werden. Während Schäden an der Gebäudehülle statistisch am Gebäudealter festgemacht werden können und damit die Wahrscheinlichkeit für einen Sanierungsanlass in Abhängigkeit des hinterlegten Alters des Gebäudes modelliert werden kann, ist der Zusammenhang mit dem Treiber „Geschäftsänderung“ außerhalb der Systemgrenzen. Im Rahmen des Projektes konnten somit nicht alle empirischen Erkenntnisse direkt im Modell operationalisiert werden. Zum anderen gibt es auch empirische Ergebnisse, die zwar mit Bezug auf ihre Wirkungszusammenhänge im Modell operationalisiert werden, für die aber aus den empirischen Ergebnissen bisher keine ausreichende Datenbasis für eine Parametrisierung vorliegen.

Der im Rahmen des Projektes entwickelte Prozess von Methodendesign der empirischen Erhebung, Datenerhebung, Parametrisierung, Modellanpassung, Feedback und Anpassung der Erhebungsmethoden hat sich jedoch als gewinnbringend und notwendig für vergleichbare Projekte gezeigt.

Im Folgende wird gezeigt wie die resultierenden empirischen Erkenntnisse in das Modell integriert worden und an welchen Stellen konzeptionelle Ansätze denkbar sind, die in weiterführenden Projekten als Ansätze dienen können.

3.2 Modellierung der Aktivitätsraten mit Bezug zu den empirischen Erkenntnissen

Die empirischen Erkenntnisse aus AP2 und AP3 zeigen, dass sich die Investitionen in Effizienzmaßnahmen und Wärmeversorgungstechnologien als Prozess beschreiben lassen. Die erste Phase ist durch Sanierungsanlässe geprägt und das Agenda-Setting, d.h. ob eine Investition überhaupt durchgeführt werden soll bzw. ein konkreter Bedarf identifiziert wird. Die zweite Phase wird durch die Motivation der Akteure gesteuert, in der konkrete Investitionsalternativen herausarbeitet werden und die Entscheidung für eine Alternative getroffen wird. Mit Bezug auf die Modellbildung in der Energiesystemmodellierung kann das Ergebnis der ersten Phase mit den resultierenden Aktivitätsraten beschrieben werden. D.h. die Anzahl der Gebäude pro Jahr, in denen eine Sanierungsmaßnahmen durchgeführt wird bzw. in denen die Heizung getauscht werden. Aggregiert werden diese Aktivitätsraten als Sanierungsrate bzw. Heizungsaustauschrate beschrieben. Im Modell Invert/ee-lab werden diese Aktivitätsraten nicht exogene vorgegeben, sondern endogen modelliert. Zentraler Treiber ist dabei das Alter der einzelnen Gebäudekomponenten und deren charakteristische Lebensdauer (Kranzl et al., 2013; Steinbach, 2015). Die Berechnung erfolgt dabei separat für Wärmeversorgungssysteme und Energieeffizienzmaßnahmen mittels einer *Weibull-Verteilung*, welche das gängigste statistische Modell zur Beschreibung der Ausfallwahrscheinlichkeit technischer Systeme darstellt (Lawless, 2003):

$$S_{bu,m,T} = \frac{\sum_{t=T-\hat{Y}}^{T-\check{Y}} 1 - e^{-\left(\frac{t}{L_m}\right)^k}}{\sum_{t=T-\hat{Y}}^{T-\check{Y}} 1 - e^{-\left(1-\frac{t}{L_m}\right)^k}}$$

m *Maßnahme: Sanierung der Gebäudehülle/
Wärmeversorgungssystemtausch*

T *Simulationsjahr*

$S_{bu,m,T}$ *Anteil der Gebäude, die in bu zum Zeitpunkt T eine Maßnahme durchführen*

\hat{Y} *Frühestes Installationsjahr/Baujahr < T*

\check{Y} *Spätestes Installationsjahr/Baujahr < T*

L_m *Charakteristische Lebensdauer*

k Formparameter der Verteilung $k = 5,5$

Die Kenngröße der *Weibull*-Verteilung ist die charakteristische Lebensdauer (L_m), bei denen eine Ausfallrate von 63,2 Prozent auftritt. Die empirischen Ergebnisse aus AP2 und AP3 bestätigen, dass ein Ausfall der Wärmeversorgung oder die Schäden an der Gebäudehülle die zentralen Anlässe für die Durchführung einer Sanierungsmaßnahme insbesondere im Wohngebäudebereich darstellen. Die Befragung der Entscheider von Büro- und Handelsgebäuden zeigen jedoch, dass die Anlässe im Nichtwohngebäudebereich vielschichtiger sind und deren Relevanz teilweise auch höher sind. Es ist nicht möglich, alle identifizierten Anlässe in der Energiesystemmodellierung abzubilden, da diese außerhalb der Systemgrenzen des Modells liegen (vgl. 3.1). Um die Aktivitätsraten nicht allein anhand der technischen Lebensdauer zu modellieren, wird das Modell jedoch innerhalb der Systemgrenzen erweitert. Dazu wird eine Energiekosten bezogenen Sanierungsrate implementiert. Im Modell kann dabei auf Ebene der Gebäudekategorien festgelegt werden, inwieweit sich der Anteil der Sanierungsrate – Anzahl von Gebäude mit Instandsetzung oder energetischen Sanierungsmaßnahmen – anhand der Entwicklung der Energieeinsparkosten im Verhältnis zu den Energiekosten verändert. Die durchschnittlichen Energieeinsparkosten ergeben sich aus den kapitalgebundenen Kosten als Annuität der Investitionen in die definierten energetischen Sanierungspaket. In jeder Simulationsperiode wird berechnet, wie weit die durchschnittlichen Energiekosten über den durchschnittlichen Energieeinsparkosten liegen. Das Verhältnis zwischen Energieeinsparkosten und Energiekosten bestimmt den Faktor der zusätzlichen Sanierungsrate (Aktivität), die nicht über die technische Ausfallrate definiert.

Mit der Implementierung wird die Modellierung eine energiebezogenen dynamischen Sanierungsrate ermöglicht und damit die grundlegende Wirkung steigender Energiekosten als Anlass für Sanierungsmaßnahmen unabhängig vom Alter der Gebäudekomponenten und installierten Technologien operationalisiert. Für eine detaillierte Parametrisierung sind jedoch weitere empirische Erhebungen erforderlich.

3.3 Integration der empirischen Ergebnisse in der Modellierung der Investitionsentscheidung

Für die Modellierung der Investitionsentscheidung sind mit Bezug auf eine geeignete Parametrisierung und direkte Operationalisierung im Gebäudemodell Invert/ee-lab insbesondere die Ergebnisse der Conjoint-Analyse relevant (siehe Bericht Conjoint-Analyse). Das Modell wird so aufgebaut, dass die Differenzierung und Parametrisierung der Entscheider-Agenten flexibel angepasst werden kann und im Zuge weiterführender Studien durch weitere empirische Erkenntnisse noch detaillierter parametrisiert werden kann. Die Eingabe erfolgt dabei wie bei den gebäudespezifischen Eingangsdaten über eine Excel-Schnittstelle. Tabelle 3 gibt einen Überblick der Variablen, mit denen Entscheider-Agenten definiert werden.

Tabelle 3: Definition der Entscheider Agenten – Variablen für jeden Agenten

Clusterung der Entscheider	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Definition einer beliebigen Anzahl an Entscheider-Agenten mit individueller Parametrisierung ▪ Zuweisung auf Referenzgebäudesegmente erfolgt auf Ebene der Gebäudeklassen
Entscheidungsvariablen Wärmeversorgung	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Investitionen (Anschaffungskosten) ▪ Energiekosteneinsparungen ▪ Verwendete Energieträger (EE/ fossil/ Kombination) ▪ THG-Emissionen

	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Marktanteile ▪ Ähnlichkeit zum existierenden Wärmeversorgungssystem ▪ Komfort ▪ Annuitätische Jahresvollkosten ▪ Amortisationszeit
Entscheidungsvariablen Sanierung	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Investitionen (Anschaffungskosten) ▪ Energiekosteneinsparungen ▪ Komfort ▪ Maximales Sanierungsbudget ▪ Amortisationszeit ▪ Annuitätische Jahresvollkosten
Wahrnehmung Attributsausprägung	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Informationsbewusstsein ▪ Bewusstsein über Förderprogramme ▪ Risikoaversion ▪ Kalkulatorischer Zinssatz
Breite der Wahlwahrscheinlichkeit bei der Marktanteilsberechnung	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Skalierungsparameter
Empfehlungsquelle	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Gewichtung auf Empfehlung durch Installateur bei Investitionsentscheidung

3.3.1 Ablauf der Investitionsentscheidung im Modell

Zunächst werden die in der vorherigen Befragung identifizierten Attribute von Sanierungsmaßnahmen und Wärmeversorgungstechnologien im Modell abgebildet. Für jede generische Entscheidungssituation im Modell, wird die Ausprägung der einzelnen Attribute für jede zur Verfügung stehende Technologie bzw. Effizienzmaßnahme berechnet. Die generische Entscheidungssituation wird im Modell separat für die Investitionsentscheidung in Wärmeversorgungstechnologien und Effizienzmaßnahmen modelliert. Die Entscheider-Agenten werden dabei den Referenzgebäudesegmenten zugewiesen. Die Ausprägung der Attribute und welche Technologien in der jeweiligen Entscheidungssituation aus technischer Sicht installiert werden können, werden somit in Abhängigkeit des Referenzgebäudes bestimmt, während die Relevanz der Attribute für die Investitionsentscheidung durch den Entscheider-Agent bestimmt werden. Die Ausprägungen der Attribute hängen neben der Technologien (z.B. Erdgaskessel, Wärmepumpe) auch von den bauphysikalischen Parametern des jeweiligen Referenzgebäudesegments - Geometrie, Qualität der Gebäudekomponenten (U-Werte) -, des installierten Wärmeverteilsystems und dessen Vor- und Rücklauftemperaturen sowie dem Sanierungszustand und der bisher installierten Technologie ab. Die daraus folgende Dimensionierung der jeweiligen Technologien führt dazu, dass sich die Skalen in den Ausprägungen der Attribute in jedem Gebäudesegment unterscheiden. Beispielsweise werden in einem Gebäude mit hoher Heizlast die Wärmeversorgungssysteme entsprechend mit höherer thermischer Leistung dimensioniert als in einem kleineren oder sanierten Gebäude. Aufgrund der höheren Leistung sind auch höhere Investitionen der zur Verfügung stehenden Wärmeversorgungssysteme (*Attribut Anschaffungskosten im Conjoint-Experiment* notwendig. Andererseits sind die relativen Energieeinsparungen (*Attribut Energieeinsparungen*) in einem bereits sanierten Gebäude insgesamt geringer als in

einem unsanierten Gebäude mit höherer Heizlast. Das verdeutlicht die Relevanz einer geeigneten Operationalisierung der empirischen Parameter, da diese im Rahmen des Conjoint-Experiments die Entscheidungsparameter nur für eine Entscheidungssituation im Rahmen der vorgegebenen Skala zeigen (vgl. 3.3.2).

Auf der Grundlage der operationalisierten Entscheidungsparameter und der berechneten Attributsausprägungen wird für jede Kombination aus Referenzgebäudesegment und Entscheider Gesamtnutzenwerte für die jeweiligen Technologien ermittelt. Die Gesamtnutzenwerte stellen die Grundlage für die Berechnung der Wahlwahrscheinlichkeiten des jeweiligen Entscheiders für das Referenzgebäudesegment dar. Da jedes Referenzgebäudesegment eine Vielzahl von realen Gebäuden repräsentiert, entsprechen diese den Marktanteilen der jeweiligen Technologien (vgl. **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.**).

Mit Abschluss der Investitionsentscheidungsmodellierung wird die Kombination aus Entscheider und Referenzgebäudesegment weiter aufgeteilt, da sich entsprechend der Marktanteile unterschiedliche „neue“ Referenzgebäudesegmente ergeben.

3.3.2 Operationalisierung der Entscheidungsparameter im Modell

Grundlage für die Operationalisierung stellen die Teilnutzenwerte (Pathworth utilities) aus dem Conjoint-Experiment für die einzelnen Attribute dar (vgl. Bericht Conjoint). Die Höhe des Teilnutzenwertes eines Attributes kann nicht mit dem Teilnutzenwert eines anderen Attributes verglichen werden. Der Vergleich der Differenzen der Teilnutzenwerte der Ausprägungen eines Attributes mit den Differenzen der Teilnutzenwerte der Ausprägungen eines anderen Attributes ist jedoch möglich. Wie bereits in 3.3.1 beschrieben, ist die Herausforderung für die Integration der Parameter im Modell, die Übertragung der im Experiment gewählten Ausprägungsskalen auf die generischen Skalen im Modell für die jeweilige Entscheidungssituation aus unterschiedlichen Referenzgebäuden und Entscheider-Agenten.

Für die Modellierung entscheidend sind daher nicht die resultierenden Gewichtungparameter des Conjoint-Experimentes, sondern die Teilnutzenwerte aus denen für jede Entscheidungssituation die jeweiligen Gewichtungparameter in Abhängigkeit der Attributsausprägungen resultieren. Dazu werden aus den Teilnutzenwerte der Attribute Skalierungsfunktion abgeleitet, mit denen die Ausprägungen der jeweiligen Attribute in den generischen Entscheidungssituationen im Modell in korrespondierende Nutzenwerte entsprechend den empirischen Ergebnissen der Conjoint-Analyse transformiert werden können. Abbildung 11 zeigt beispielhaft die Skalierungsfunktionen für das Attribut Sanierungskosten – Höhe der Investitionen – bei der energetischen Sanierungsentscheidung und Höhe der Energieeinsparungen.

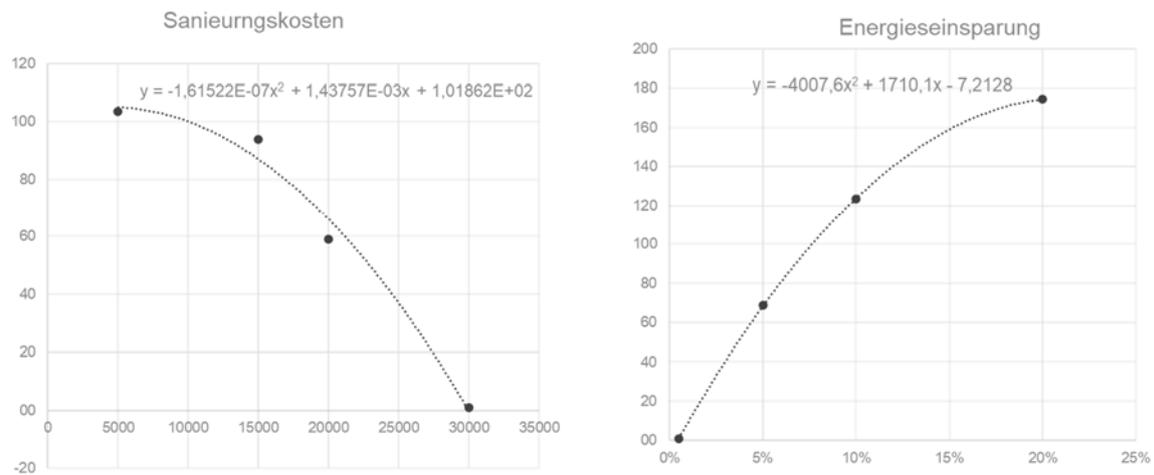


Abbildung 11: Skalierungsfunktion für die Operationalisierung der Teilnutzenwerte für die Attribute Sanierungskosten und Energieeinsparung

Die relativen Gewichtungsfaktoren für die Attribute ergeben sich entsprechend der Conjoint-Methode aus der Bandbreite der resultierenden Teilnutzenwerte. Abbildung 12 zeigt schematisch die Berechnung der Gewichtungsfaktoren bei nur zwei Attributen. Der Vorteil der Methode ist, dass die Gewichtungsfaktoren in Abhängigkeit der Entscheidungssituation angepasst werden. In einer generischen Entscheidungssituation, in der alle Technologien in einem bestimmten Referenzgebäudesegment zu Energieeinsparungen in ähnlicher Höhe führen, wird der Gewichtungsfaktor für das Attribut „Energieeinsparung“ dadurch an Relevanz verlieren.

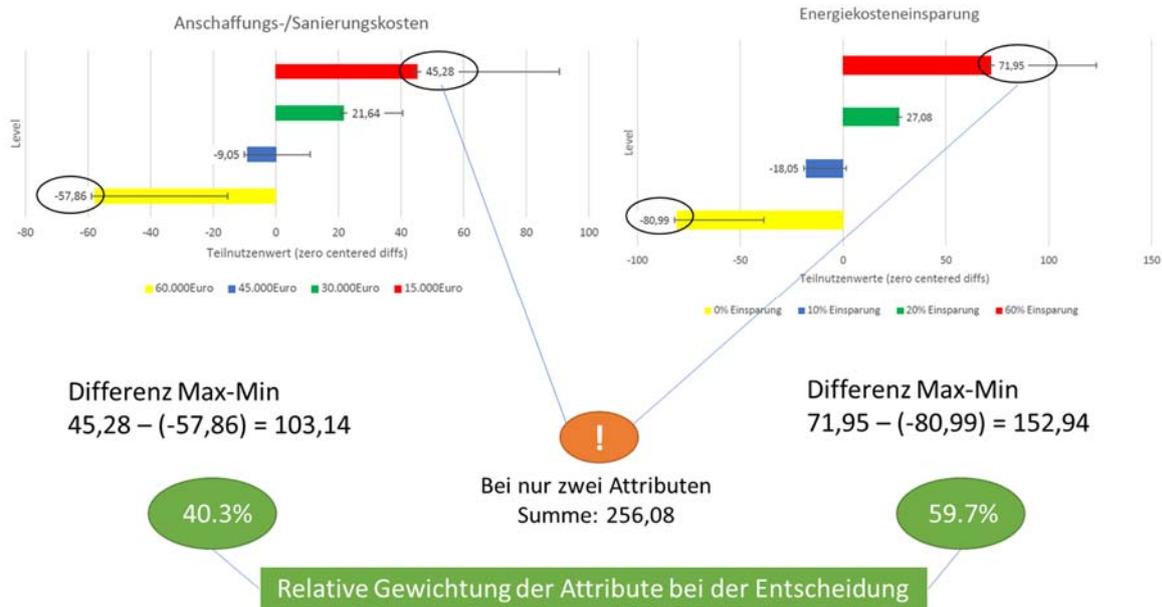


Abbildung 12: Schematische Darstellung der Berechnung der Gewichtungsfaktoren

Neben der Operationalisierung der Entscheidungskriterien und deren Relevanz bei der Investitionsentscheidung wird im Modell auch die Wahrnehmung der Entscheider-Agenten operationalisiert. Die ingenieurtechnische Berechnung der techno-ökonomischen Attribute in Energiesystemmodellen unterstellt immer implizit einen perfekt informierten Entscheider, der damit die Attributsausprägung aller Technologieoptionen wie die Höhe der Investitionen oder die Energieeinsparungen kennt. Die empirischen Ergebnisse haben jedoch auch die Unterschiede in den Informations- und Beratungsquellen identifiziert, die im Endeffekt zu unterschiedlichen Ergebnissen in der Bewertung der Kriterien führen. Zusätzlich zu den Entscheidungskriterien werden im Modell dazu folgende individuelle Wahrnehmungsvariablen zur Beschreibung der Entscheider-Agenten implementiert (Tabelle 4).

Tabelle 4: Operationalisierungsvariablen für die Wahrnehmung der Attributsausprägung

Variable	Beschreibung
inf_{in} :	Informationswahrnehmung $inf_{in} \in \mathbb{R}^+ \mid inf_{in} \leq 1$
$asub_{in}$:	Bewusstsein über Fördermittel $asub_{in} \in [0,1]$
$risk_{in}$:	Risikoaversion $risk_{in} \in [0,1]$
$pcalc_{in}$:	Energiepreiswahrnehmung

Damit können unterschiedliche Informationsfindungsszenarien im Modell operationalisiert werden. Im Folgenden werden dazu Beispiele beschrieben, die sich an den Erkenntnissen der empirischen Befragung für die Entscheidungssituation in Wärmeversorgungstechnologien im Modell orientieren:

- **Szenario Professionelle Informationsgewinnung:** Die Investitionsentscheidung erfolgt geplant und der Entscheider ist motiviert sich möglichst gut zu informieren und dafür auch Transaktionskosten und Beratungskosten zu tragen. Der Entscheider-Akteur verwendet verschiedene Informationsquellen und wird durch einen professionellen Energieberater beraten, so dass alle Ausprägungen der Attribute bekannt sind. Der Entscheider ist über alle Förderprogramme und ordnungsrechtlichen Anforderungen informiert. Die Kalkulation der Energieeinsparung erfolgt anhand der vom Energieberater empfohlenen Methodik unter Berücksichtigungen zukünftiger Energiepreisentwicklungen, die sich aus der Steigerung der Vergangenheit und geänderter Rahmenbedingungen, z.B. CO₂ Bepreisung ergibt.
 - Operationalisierung: Im Modell werden bei der Investitionsentscheidung alle verfügbaren Technologien einbezogen. Technologische Einschränkungen, die sich aus ordnungsrechtlichen Anforderungen zum Mindeststandard energetischer Sanierungsmaßnahmen ergeben, werden berücksichtigt. Eine reine Instandhaltungsoption kann vom Entscheider-Akteur nicht gewählt werden. Investitionskostenzuschüsse aus den Förderprogrammen werden von dem Attribut Investitionen entsprechend der hinterlegten Fördersätze abgezogen ($asub_{in} = 1$). Bei der Kalkulation der Energiekosteneinsparungen werden zukünftige Energiepreissteigerungen anhand der Energiepreissteigerungen der vergangenen drei Perioden und entsprechend der ingenieurtechnischen Normen berechnet (VDI 2067-1, 2012).
- **Szenario Technologie-orientierter-Informationsgewinnungsprozess:** Der Informationsgewinnungsprozess ist umfangreich, insbesondere zu den technischen Möglichkeiten und Optionen. Der Entscheider lässt sich jedoch nicht professionell beraten. Er ist nicht bereit, Geld für externe Beratung zu bezahlen, hat aber ein hohes Interesse sich selbst zu den möglichen Technologien und deren Funktionsweisen zu informieren. Insbesondere mit Bezug auf aktuelle politische Förderinstrumente sind seine Kenntnisse unzureichend bzw. hat er auch kein Interesse Zeit für Förderanträge vor der Investitionsentscheidung aufzuwenden.
 - Operationalisierung: Im Modell werden bei der Investitionsentscheidung alle verfügbaren Technologien einbezogen. Allerdings werden ordnungsrechtliche Anforderungen zu energetischen Sanierungsmaßnahmen nicht berücksichtigt. Diesem Entscheider-Agent wird es im Modell grundsätzlich auch erlaubt reine Instandsetzungsmaßnahmen bei der Sanierung durchzuführen ($inf_{in} < 1$ oder $inf_{in} = 0$). Mit Bezug auf die Förderinstrumente werden Investitionszuschüsse bei der Bewertung der Technologien nicht einbezogen ($asub_{in} = 0$). Die Energiekosteneinsparung erfolgt anhand der zum Zeitpunkt der Investitionsentscheidung bekannten Energiepreise. Zukünftige Energiepreissteigerungen werden in der Berechnung der Attributsausprägungen nicht berücksichtigt.
- **Szenario Ad-hoc-Informationsgewinnungsprozess:** Für die Informationsgewinnung wird wenig Zeit aufgewendet, da entweder kein Interesse besteht oder die Investitionsentscheidung unter hohem Zeitdruck erfolgt, z.B. aufgrund eines Ausfalls der Wärmeversorgung oder Schäden an der Gebäudehülle. Die Informationsgewinnung basiert auf den eigenen Erfahrungen, die

keine neuen Quellen einbezieht, sowie gegebenenfalls den Informationen des gewerkespezifischen Handwerkers (Installateur, Maler, Dachdecker, Fensterbauer), der die Fehler bzw. Schäden des entsprechenden Gewerks (Wärmeversorgung, Außenwand, Dach, Fenster) feststellt.

- Operationalisierung: Der Entscheider-Agent kennt weder die aktuellen Förderinstrumente ($asub_{in} = 0$), noch berücksichtigt er bei der Investitionsentscheidung, dass er bei der Instandsetzung der Schäden an der Gebäudehülle und Sanierung bestimmte Mindestanforderungen zur energetischen Sanierung einhalten muss. Im Modell wird dem Entscheider-Agent erlaubt auch eine reine Instandsetzung durchzuführen ($inf_{in} = 0$). Ziel ist es, die Informationen möglichst zu minimieren, um schnell zu einer Investitionsentscheidung zu kommen. Im Modell kann dies zusätzlich durch die daraus folgenden Entscheidungsstrategien abgebildet werden, so dass der Entscheider-Agent die möglichen Technologieoptionen für die generische Entscheidungssituation durch eine Rekognitionsheuristik (Goldstein & Gigerenzer, 1999; Jäger, 2000) reduziert. Im Modell wird das abgebildet, indem Technologien einbezogen werden, die den in dem Referenzgebäudesegment vorher installierten Technologien ähnlichen sind. Der Grad der Ähnlichkeit wird im Modell anhand des verwendeten Energieträgers sowie der definierten Systemkategorie (vgl. **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.**) berechnet.

Die dargestellten Szenarien zur Operationalisierung des Informationsprozesses zeigen den Umfang der möglichen Integration im Modell. Die empirischen Ergebnisse identifizieren die Relevanz dieser Wirkungszusammenhänge, allerdings konnte im Rahmen dieses Projektes keine hinreichende Parametrisierung ermittelt werden, so dass diese Effekte nur generisch modelliert werden können.

3.3.3 Modellierung der Marktanteile

Die Berechnung der Marktanteile erfolgt auf Basis der beschriebenen Berechnung der Gesamtnutzenwerte, deren Operationalisierung und Parametrisierung wie beschrieben auf Grundlage der empirischen Ergebnisse aus AP2 erfolgt. Darauf aufbauend wird die Wahlwahrscheinlichkeit und damit die Marktanteile der generischen Entscheidungssituation für die jeweilige Kombination aus Referenzgebäudesegment und Entscheider simuliert. Die Berechnung erfolgt mittels einer logistischen Verteilfunktion auf Basis eines *Nested-Logit-Modells*, welches auf die Simulation von Marktanteilen auf Basis von gewonnenen Nutzwerten im Choice-Experiment (Train, 2002) bzw. der *Random-Utility-Theory* (Marschak, 1960) zurückgeht. Die theoretische Grundlage basiert darauf, dass Nutzwerte ein Maß für die Wahrscheinlichkeit darstellen, dass eine Alternative tatsächlich gewählt wird. Da jede Kombination aus Referenzgebäudesegment und Entscheider-Agent im Modell eine Vielzahl realer Gebäude repräsentiert, kann die ermittelte Wahlwahrscheinlichkeit mit den Marktanteilen interpretiert werden.

Das *Logit-Modells* unterstellt, dass die in den empirischen Befragungen gewonnenen Nutzwerte nur den durch das Choice- oder Conjoint-Experiment vorgegebenen Teil der tatsächlichen Nutzenfunktion darstellt. Die eigentliche Nutzenfunktion besteht aus den beobachteten Faktoren (x), welche durch die in der empirischen Befragung identifizierten und parametrisierten Attribute (Investitionen, Energiekosteneinsparung, zusätzliche Nutzen, Empfehlungen, etc.) gegeben ist sowie den unbeobachteten Faktoren ε . Da diese nicht bekannt kann der Term der unbeobachteten Faktoren als Zufallsvariable beschrieben werden. Dies bedeutet, dass das tatsächliche Entscheidungsverhalten stochastisch ist und damit keiner absoluten Positionen folgt – alle wählen die Alternative mit dem höchsten Nutzwert – sondern als Wahlwahrscheinlichkeit ermittelt werden kann. Die Nutzenfunktion eines Entscheider-Agenten (d) für eine Technologieoption (j) kann somit folgendermaßen beschrieben werden:

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

$$V_{d,j} \quad \text{Beobachtbarer Nutzwert der Alternative } j \text{ für Entscheidungsträger } d$$

Unter den Annahmen zu der Verteilungsfunktion für unbeobachteten Nutzen kann die Formel für die Marktanteilsberechnung mit mehr als zwei Alternativen als *multinominales Logit-Modell* hergeleitet werden (vgl. (Henkel, 2011; Train, 2003)). Die folgende Formel beschreibt die Marktanteilsberechnungen mit dem multinominalen Logit-Modell:

$$ms_{j,bu,int,t} = \frac{e^{\hat{V}_{j,bu,int,t}}}{\sum_{j=1}^J e^{\hat{V}_{j,bu,int,t}}}$$

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

$$ms_{j,bu,int,t} \quad \text{Maximale Marktanteile der Technologieoption } j \text{ in Referenzgebäude-}$$

$$\hat{V}_{j,bu,int,t} \quad \text{Relativer Nutzen von Technologieoption } j \text{ in Referenzgebäude-}$$

$$\lambda \quad \text{Skalierungsparameter}$$

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

Da die zur Verfügung stehenden Technologieoptionen für die generischen Entscheidungssituationen jedoch nicht vollständig unabhängig voneinander sind, wird im Modell ein dreistufiges *Nested-Logit-Modell* als Marktanteilssimulationsfunktion implementiert. Dieses ist zwar mit Bezug auf die Implementierung und Berechnung komplexer, ermöglicht aber eine höhere technologische Differenzierung und Hinzunahme von Technologien, die nicht direkt in der empirischen Befragung enthalten waren. So können beispielsweise unterschiedliche Wärmepumpentechnologien oder Kombinationen von Technologien (Solarthermie) abgebildet werden ohne dass sich dadurch unrealistische Verschiebungseffekte ergeben, die nicht durch die Erkenntnisse aus dem Conjoint-Experiment gedeckt sind. Für eine detaillierte Beschreibung und Herleitung des funktionalen Zusammenhangs und Begründung der Eignung für die Modellierung wird auf Steinbach (2015) und (Müller, 2015) verwiesen.

Für die Anwendung des Modells ist dabei relevant, dass ähnliche Technologien in Systemkategorien zusammengefasst werden. Das Modell ermöglicht hierbei, wie bei den anderen Eingangsdaten zur Definition der Entscheider, eine hohe Flexibilität, die dem Nutzer erlaubt diese Kategorisierung vorzunehmen.

3.4 Modellierung der Einflüsse und Marktbeschränkungen

Die Integrationen der identifizierten und parametrisierten Entscheidungsvariablen ermöglichen das Investitionsverhalten im Gebäudebereich in Abhängigkeit individueller Entscheider-Agenten bei gegebenen Technologien zu modellieren. Dabei wird jedoch vernachlässigt, dass der Zugang zu Technologien aufgrund von Marktdynamiken eingeschränkt ist oder der Entscheider aufgrund von Einflüssen und selektiven Informationen in den gegebenen Entscheidungssituationen zusätzlicher Nutzenwerte für bestimmte Alternativen ergeben, die nicht auf die direkten Attribute der jeweiligen Optionen zurückzuführen sind. Die Relevanz dieser Einflüsse zeigt sich nicht nur bei der Befragung Wohngebäudeeigentümer, sondern sehr deutlich auch in den Ergebnissen des Conjoint-Experiments, welches die Zunahme des Gesamtnutzwertes aufgrund der favorisierten Empfehlungsquelle quantifiziert.

Im Modell Invert/ee-lab werden Marktbegrenzung und Einflüsse über Diffusionsmodelle implementiert. In der Literatur gibt es eine Vielzahl unterschiedlicher Diffusionsmodelle mit der die Geschwindigkeit der Marktdurchdringungen von Technologien beschrieben werden. Die mathematische Formulierung geht dabei auf das Grundmodell von Bass, (1967). Der Modellansatz eignet sich nur bedingt für die Modellierung von Wahlentscheidungen in alternative Technologien, allerdings lässt sich der Zusammenhang von maximalen Diffusionsraten (Marktanteilen und Bestand) in Abhängigkeit der Entscheidungen aller Akteure in den vorangegangenen Perioden sowie der Geschwindigkeiten eines Markthochlaufs, der beispielweise durch Herstellerkapazitäten und den Kenntnisstand der Installateure gegeben ist, modellieren.

Für die Simulation der Investitionsentscheidung in Wärmeversorgungstechnologien können diese Restriktionen im Modell berücksichtigt und parametrisiert werden, woraus sich für jedes Simulationsjahr maximale Marktanteile für die einzelnen Technologien ergeben. In jedem Simulationsschritt wird dabei überprüft, ob die Aggregation der jeweiligen Marktanteile der Technologien aus den simulierten Investitionsentscheidungen aller Entscheider-Agenten die maximalen Markthochläufe für das jeweilige Simulationsjahr überschreiten. Wenn dies der Fall ist, erfolgt eine entsprechende Anpassung der aggregierten Marktanteile.

Folgende Eingangsdaten für das Diffusionsmodell lassen sich dabei technologiespezifisch parametrisieren:

- **Diffusionszeit:** Charakteristische Dauer, bis eine Technologie die volle Marktdurchdringungen erreichen kann, d.h. den zu definierenden maximalen Anteil am Gesamtbestand der Wärmeversorgungstechnologien
- **Rückgangzeitfaktor:** Definition wie schnell eine Technologie aus dem Markt verschwinden kann im Vergleich zu der charakteristischen Diffusionszeit. Gibt damit die Geschwindigkeit eines marktgetriebenen Phase-Outs ohne Politikintervention wie Verbot vor
- **Zeitfaktor:** Gibt die Gewichtung auf die vergangenen Perioden bei der Berechnung des maximalen Markthochlaufs an. Je kleiner der Faktor, desto weniger abhängig ist der Marktanteil von den Entscheidungen der Vorperioden
- **Maximale Marktdurchdringung:** Maximaler Marktanteil am Bestand, die eine Technologie innerhalb der definierten Diffusionszeit erreichen kann.

Zusätzlich zu der damit möglichen Operationalisierung genereller Marktbeschränkungen und Einflüssen durch Empfehlungen von Marktakteuren, die z.B. durch den Kenntnisstand von Installateuren bestimmt ist, können auch die Einflüsse durch die Entscheidung anderer in der gleichen Gebäudekategorie berücksichtigt werden. Hierbei kann der Gewichtungsfaktor zwischen 0 und 1 festgelegt werden, wobei 1 bedeutet, dass die Entscheidung vollständig auf Basis der Entscheidungen anderer Eigentümer in der gleichen Gebäudekategorie getroffen wird.

Für die Szenarienmodellierung in Kapitel 4 werden die Entscheider-Agenten mit und ohne Diffusionsrestriktionen in unterschiedlichen Szenarien modelliert. Der Anteil der Einflussnahme wird dabei über die identifizierten Gewichtungsfaktoren für Empfehlungsquellen parametrisiert.

4 Szenarienmodellierung und Ergebnisse

4.1 Definition der Szenarien

Nach der Operationalisierung und Parametrisierung der Gebäude-, Technologie- und Akteursdaten werden verschiedene Szenarien mit Bezug auf die Entscheider-Agenten gerechnet. Die Unterschiede im Szenariodesign beziehen sich dabei insbesondere auf die in der Befragung und dem Conjoint-Experiment identifizierten Segmentierungen unterschiedlicher Eigentübertypen im Wohngebäudebereich. Aus dem Experiment und der anschließenden Clusterung werden zwei unterschiedliche Typen identifiziert, die sich mit Bezug auf das Investitionsentscheidungsverhalten bei Energieeffizienzmaßnahmen und Wärmeversorgungssystemen unterscheiden.

Mit der Conjoint-Analyse ist der *Cost-sensitive* Entscheider identifiziert worden, der eine hohe Relevanz auf die Attribute Energiekosteneinsparungen und Anschaffungskosten legt, während der *Source-technology-sensitive* Entscheider auch die Ähnlichkeit zum vorhandenen Heizsystems stärker in seine Entscheidung einbezieht und inwieweit das neue Heizsystem bereits am Markt etabliert ist. Energiekosteneinsparungen und Anschaffungskosten liegen gleich auf, so dass die Rentabilität bzw. Amortisationszeit für diesen Entscheider-Typen wichtig sind. Ein zentraler Unterschied liegt jedoch auch in der Gewichtung der Empfehlungsquelle.

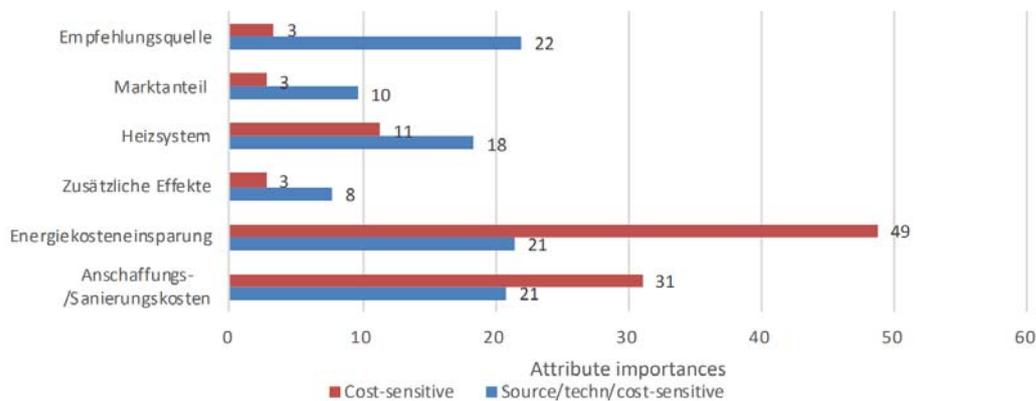


Abbildung 13: Relevanz der Attribute bei der Wärmeversorgungssystemwahl im Conjoint-Experiment

Bei der Sanierungsentscheidung (Effizienzmaßnahmen an der Gebäudehülle) hat sich die gleiche Segmentierung ergeben, jedoch mit teilweise anderen Attributen und Ausprägungen in den Gewichtungen und Teilnutzenwerten. Da, wie beschrieben, die generische Entscheidungssituation in Energieeffizienzmaßnahmen und Wärmeversorgungssysteme separat modelliert wird und die Parametrisierung für die Entscheider-Agenten ebenfalls separat erfolgt, können die Erkenntnisse aus beiden Conjoint-Experimenten im Modell integriert werden.

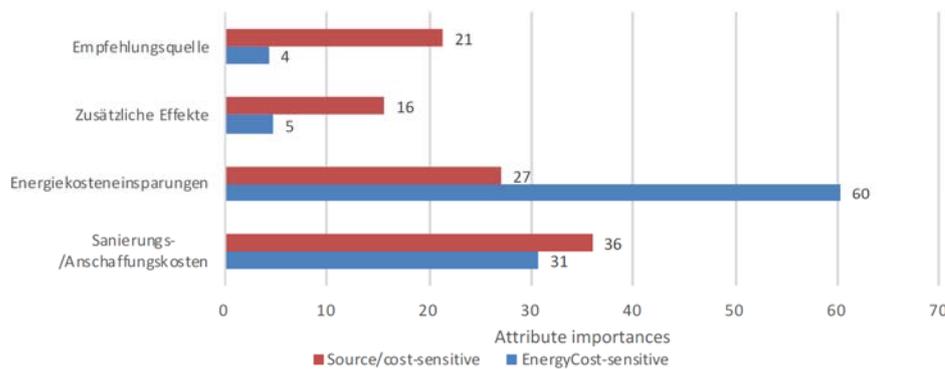


Abbildung 14: Relevanz der Attribute bei der Entscheidung in Energieeffizienzmaßnahmen im Conjoint-Experiment

Quelle: Diffusion EE-AP2-Bericht

Aus den vorliegenden Daten und Analysen können allerdings nicht die tatsächlichen Anteile der identifizierten Entscheidungstypen an der Grundgesamtheit aller selbstnutzenden Eigentümer im Gebäudebestand in Deutschland quantifiziert werden. Die Segmentierung folgt zwar aus den Ergebnissen des Experimentes und der Clusteranalyse, jedoch liegt keine hinreichende Korrelation mit soziodemografischen Parametern wie Alter, Einkommen oder Bildungsgrad vor, mit der eine statistische Hochrechnung möglich wäre.

Aus diesem Grund werden unterschiedliche Szenarien gerechnet, in denen jeweils angenommen wird, dass alle selbstnutzenden Eigentümer von Ein- und Zweifamilienhäusern entweder dem *Cost-Sensitive* oder dem *Source-Sensitive Entscheider-Agenten* entsprechen. Die Szenarien werden jeweils mit und ohne Diffusionsbeschränkungen aufgrund von Markverfügbarkeiten bzw. Änderungsgeschwindigkeiten sowie Einflüssen durch Empfehlungen berechnet (vgl. 3.4), so dass insgesamt vier unterschiedliche Szenarien für die identifizierten Entscheider-Agenten modelliert werden. Um die Ergebnisse mit den identifizierten Entscheider-Typen einzuordnen, werden zudem noch jeweils ein Szenario mit einem generischen *Rationalen-Entscheider-Agenten* sowie einem generischen *Instandsetzer-Entscheider-Agenten* gerechnet. Der *Rationale-Entscheider-Agent* ist vollumfänglich informiert und trifft seine Entscheidung auf Basis der Wärmebereitstellungskosten auf Grundlage einer ökonomisch korrekten Bewertung nach Annuitäten- bzw. Kapitalwertmethode. Als kalkulatorischer individueller Zinssatz werden 2 Prozent angenommen. Der generische *Instandsetzer-Entscheider-Agent* trifft die Entscheidung anhand der Höhe der Investitionen und ist uninformiert über Förderprogramme und ordnungsrechtliche Mindestanforderungen bei der Sanierung.

Die Entscheider-Agenten für die anderen Wohngebäudesegmente (private Vermieter und Wohnungsgesellschaften) waren nicht Teil der empirischen Untersuchungen. Für diese wird in allen Szenarien ein *Rationaler-Entscheider-Agent* angenommen. Für die privaten Vermieter wird ebenfalls ein Zinssatz von 2 Prozent angenommen, bei den Wohnungsgesellschaften 5 Prozent. In der Klasse der Vermieter fließt im Modell bei der Simulation Investitionsentscheidung jedoch nicht die Energieeinsparung ein, sondern die berechnete mögliche Modernisierungsumlage entsprechend Mietrechtsanpassungsgesetz³. Bei der empirischen Untersuchung der Nichtwohngebäude hat sich gezeigt, dass die Sanierungsanlässe sehr heterogen sind und zum größten Teil außerhalb der Systemgrenzen der Modellierung liegen. Für die Entscheidungskriterien konnte keine Tendenz ermittelt werden, die gegen einen rational agierenden Akteur spricht, so dass für die Büro- und Handelsgebäude sowie die anderen Nichtwohngebäude ebenfalls ein *Rationaler-Entscheider-Agent* angenommen wird. Als individueller kalkulatorischer Zinssatz werden auch

³ Gesetz zur Ergänzung der Regelungen über die zulässige Miethöhe bei Mietbeginn und zur Anpassung der Regelungen über die Modernisierung der Mietsache (Mietrechtsanpassungsgesetz–MietAnpG) vom 18. Dezember 2018. <https://www.bmjv.de/SharedDocs/Gesetzgebungsverfahren/DE/MietAnpG.html>

5 Prozent angesetzt. Die Unterschiede in den Szenarien betreffen somit nur einen Teil des Gebäudebestandes (vgl. 2.2). In der Ergebnisdarstellung wird daher nicht nur die Gesamtentwicklung des Gebäudebestandes eingegangen, sondern im speziellen die resultierenden Marktanteile der implementierten Entscheider-Agenten dargestellt, die aus der empirischen Untersuchung parametrisiert wurden.

Insgesamt werden also folgende Szenarien für den Simulationszeitraum von 2018 bis 2050 modelliert:

- Szenario Cost-Sensitive-Entscheider-Agent ohne Marktrestriktionen
- Szenario Source-Sensitive-Entscheider-Agent ohne Marktrestriktionen
- Szenario Rationaler-Entscheider-Agent ohne Marktrestriktionen
- Szenario Instandsetzer-Entscheider-Agent ohne Marktrestriktionen
- Szenario Cost-Sensitive-Entscheider-Agent mit Marktrestriktionen
- Szenario Source-Sensitive-Entscheider-Agent mit Marktrestriktionen

4.2 Allgemeine Rahmendaten für die Szenarien

4.2.1 Energiepreis

In Abbildung 15: Endverbraucherpreise Haushalte Biomasse und Biogas (inkl. MwSt.) sind die Endverbraucherpreise für Haushalte für Biomasse und Biogas dargestellt. Da die Preise für Holzpellets, Scheitholz und Hackschnitzel an den Preis für Öl gekoppelt sind, findet aufgrund der CO₂-Steuer eine Steigerung der Preise von 2020 bis 2030 statt.

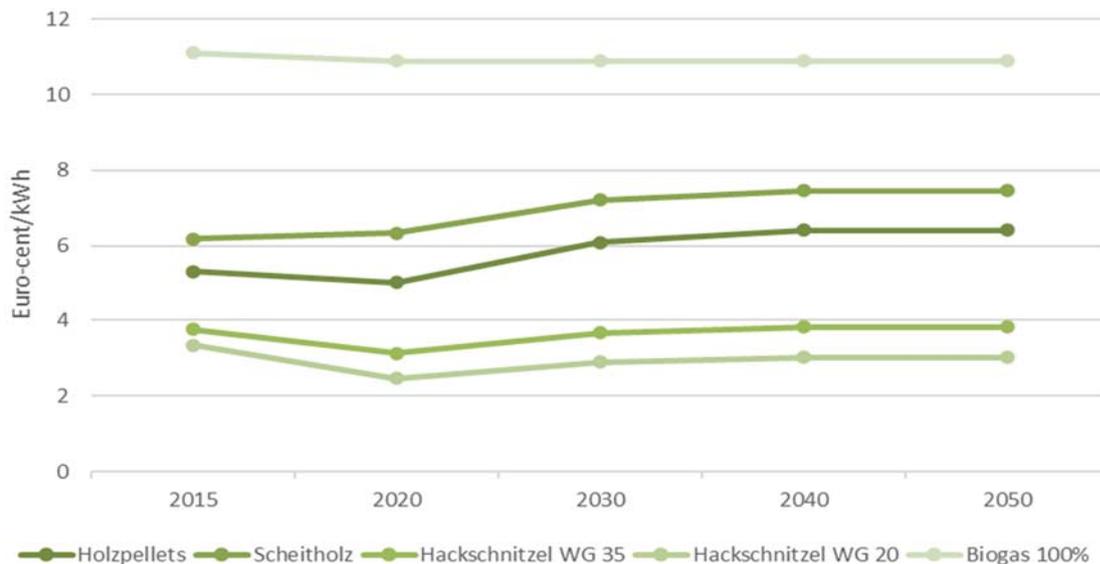


Abbildung 15: Endverbraucherpreise Haushalte Biomasse und Biogas (inkl. MwSt.)

Quelle: (Öko-Institut et al., 2020)

In Abbildung 16 sind die Endverbraucherpreise für Strom für Haushalte dargestellt. Dabei wird in Strom und günstigeren Strom für Wärmepumpen unterschieden.

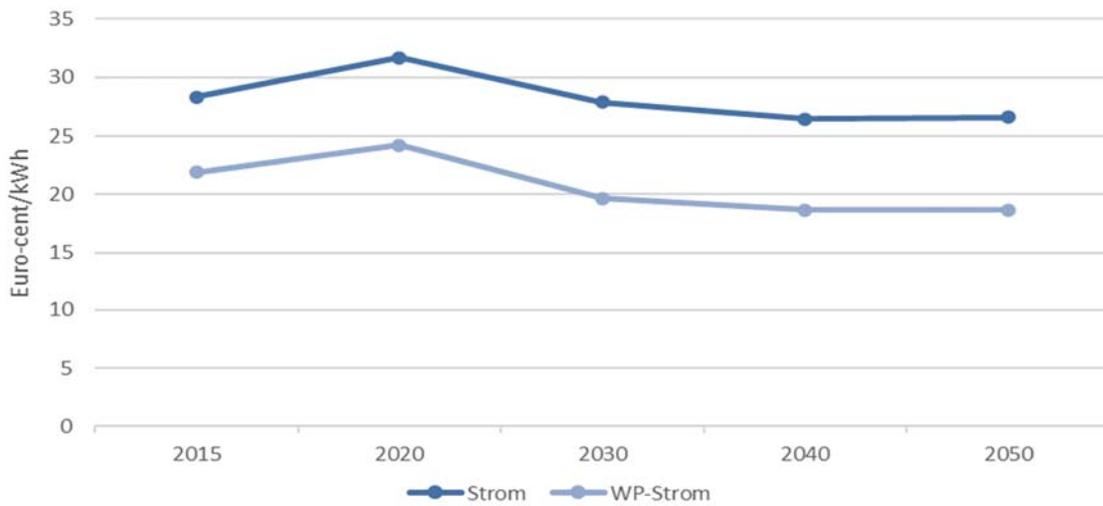


Abbildung 16: Endverbraucherpreise Haushalte Strom (inkl. MwSt.)⁴

Quelle: (Öko-Institut et al., 2020)

Abbildung 17: Endverbraucherpreise Haushalte fossile Brennstoffe und Fernwärme zeigt die Endverbraucherpreise für Haushalte für fossile Brennstoffe und Fernwärme.

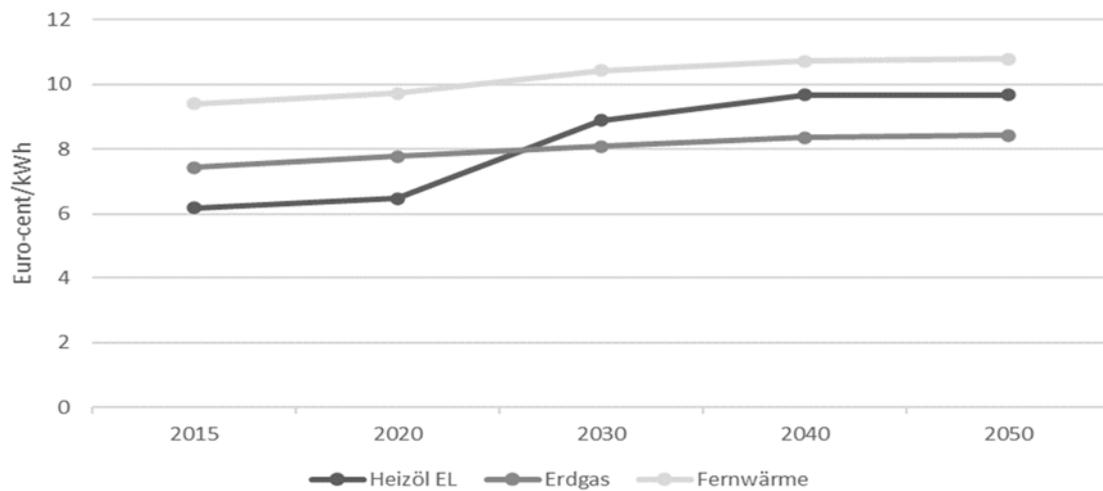


Abbildung 17: Endverbraucherpreise Haushalte fossile Brennstoffe und Fernwärme

Quelle: (Öko-Institut et al., 2020)

4.2.2 Energie- und klimapolitische Instrumente

Im Modell werden sowohl die zentralen Förderinstrumente als auch die ordnungsrechtlichen Anforderungen im Gebäudebereich berücksichtigt. Dies umfasst insbesondere auch die Beschlüsse des Klimaschutzprogramms 2030 vom Oktober 2019. Im Folgenden werden die zentralen Instrumente für den Gebäudebereich zusammengefasst.

⁴ Vorläufige Endverbraucherpreise aus Politikszenerarien IX

Finanzielle Förderung von Wärmeversorgungssystemen und Energieeffizienzmaßnahmen durch die Bundesförderungen energieeffiziente Gebäude und steuerliche Abschreibung Gebäudesanierung

Die spezifischen Fördersätze werden entsprechend der zum Stand November 2020 geltenden Förderrichtlinien im Marktanreizprogramm sowie den KfW-Programmen zur energetischen Gebäudesanierung und zum energieeffizienten Neubau berücksichtigt. **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.** zeigt die spezifischen Fördersätze für die Wärmeversorgungssysteme, die im Trendszenario berücksichtigt werden.

Tabelle 5: Spezifische Fördersätze Wärmeversorgungssysteme entsprechend der geltenden Förderrichtlinie

Technologien	Investitionszuschuss
Biomasseanlagen	35 %
Wärmepumpen	35 %
Solarthermieanlagen	30 %
Gas-Hybridheizung ⁵	30 %
Renewable Ready Gas Brennwert ⁶	20 %
Zusätzliche Austauschprämie Ölheizung	10 %

Quelle: Eigene Darstellung; BAFA

Bei den energetischen Sanierungsmaßnahmen werden im Modell gebäudespezifische Sanierungspakete hinterlegt, mit denen eine Standardsanierung nach GEG oder ambitionierte KfW Sanierung erreicht werden kann. Für jedes Referenzgebäude können jedoch nur zwei KfW Standards direkt hinterlegt werden, so dass nicht alle KfW-Effizienzhausstandards entsprechend **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.** direkt im Modell hinterlegt sind. Um die Bandbreite abzudecken werden der KfW 55 und der KfW 100 Standard mit den entsprechenden energetischen Anforderungen an die Gebäudehülle und den spezifischen Investitionen und Fördersätzen hinterlegt.

Tabelle 6: Spezifische Fördersätze für energetische Sanierungsmaßnahmen

KfW-Effizienzhaus-Standard	Investitions-/ Tilgungszuschuss	Maximaler Investitions- / Tilgungszuschuss
Wohngebäude		
Sanierung KfW 55	40 %	48.000 €
Sanierung KfW 70	35 %	42.000 €
Sanierung KfW 85	30 %	36.000 €
Sanierung KfW 100	27,5 %	33.000 €
Sanierung KfW 115	25 %	30.000 €
Sanierung KfW Denkmal	25 %	30.000 €
KfW-Einzelmaßnahmen	20 %	10.000 €
Neubau KfW 40 Plus	25 %	30.000 €
Neubau KfW 40	20 %	24.000 €
Neubau KfW 55	15 %	18.000 €

⁵ Der EE-Wärmeerzeuger muss mindestens 25 % der Heizlast decken. Berechnung der Heizlast bei Solarthermie: 635 W / m²

⁶ Gas-Brennwertkessel mit Regelungs- und Steuertechnik, die eine spätere Einbindung erneuerbarer Energien ermöglicht. Die Umrüstung auf eine Hybridheizung muss spätestens 2 Jahre nach Installation des Gas-Brennwertkessels erfolgen.

<i>Nichtwohngebäude</i>		
Sanierung KfW 55	27,5 %	275 €/ m ²
Sanierung KfW 100	20 %	200 €/ m ²
Sanierung KfW Denkmal	17,5 %	175 €/ m ²
KfW-Einzelmaßnahmen	20 %	200 €/ m ²
Neubau KfW 55	5 %	50 €/ m ²
Neubau KfW 70	Kein Zuschuss / nur Kredit	

Mit der Bundesförderung energieeffiziente Gebäude (BEG) und der steuerlichen Förderung Gebäudesanierung werden die finanziellen Förderinstrumente zusammengeführt und hinsichtlich der Höhe der spezifischen Förderung für Effizienzmaßnahmen und Wärmeversorgungssysteme sowie die zur Verfügung stehenden Budgets verbessert.

Gebäudeenergiegesetz

Mit dem Gebäudeenergiegesetz sind die Energieeinsparverordnung (EnEV), das Energieeinspargesetz (EnEG) und das Erneuerbare-Wärme-Gesetz zusammengeführt worden⁷. Die ordnungsrechtlichen Anforderungen an Neubauten und Sanierungen im Bestand werden im Vergleich zur EnEV 2016 jedoch nicht verschärft. Als zentrale Änderung beinhaltet das Gesetz ein Einbauverbot für monovalente Heizölkessel ab dem Jahr 2026 (§72 (4)).

CO₂-Bepreisung fossiler Brennstoffe durch das Brennstoffemissionshandelsgesetz

Neben der Verbesserung der Förderung und dem Verbot für bestimmte fossile Technologien, werden durch die Verabschiedung des Brennstoffemissionshandelsgesetz (BEHG)⁸ fossile Brennstoffe im Gebäudebereich entsprechend ihres CO₂-Gehalts ab dem Jahr 2021 versteuert. Mit dem Gesetz werden die Inverkehrbringer fossiler Brennstoffe im Gebäude und Verkehrsbereich dazu verpflichtet Emissionszertifikate zu erwerben. Im Zeitraum bis zum Jahr 2025 wird der CO₂-Preis für die Zertifikate vorgegeben und steigt von 25 EURO/t CO₂äq im Jahr 2021 auf 55 EURO/t CO₂äq im Jahr 2025. Danach wird sich der Preis für die Zertifikate entsprechend Angebot und Nachfrage am Markt bilden, wobei für das Jahr 2026 ein Preiskorridor von 55 bis 65 EURO/ t CO₂äq vorgegeben ist (Bundesregierung, 2020). Die Annahmen zur weiteren Entwicklung der CO₂ Bepreisung bis 2040 werden aus den Rahmendaten zum Projektionsbericht 2021 übernommen (Öko-Institut et al., 2020) Für den Zeitraum ab 2027 wird darin angenommen, dass der Preis jährlich nominal um 15 EURO bis auf 275 €/t CO₂ im Jahr 2040 ansteigt. Für den Zeitraum 2040 bis 2050 wird angenommen, dass der Preis konstant bleibt (Abbildung 18: Annahme zur Entwicklung der CO₂-Preise für Verkehr und Wärme im BEHG). Bis 2050 steigen damit in allen Szenarien die Endverbraucherpreise für fossile Brennstoffe signifikant.

⁷Gebäudeenergiegesetz vom 8. August 2020 (BGBl. I S. 1728). <http://www.gesetze-im-internet.de/geg/GEG.pdf>

⁸Brennstoffemissionshandelsgesetz vom 12. Dezember 2019 (BGBl. I S. 2728), das durch Artikel 1 des Gesetzes vom 3. November 2020 (BGBl. I S. 2291) geändert worden ist. <http://www.gesetze-im-internet.de/behg/BEHG.pdf>

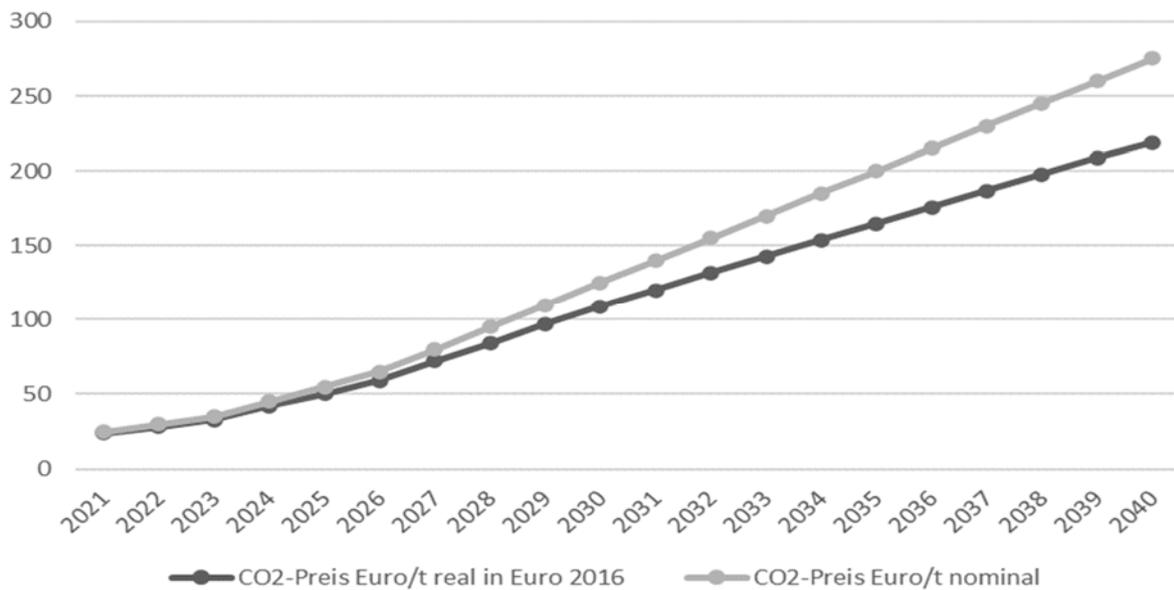


Abbildung 18: Annahme zur Entwicklung der CO₂-Preise für Verkehr und Wärme im BEHG

Quelle: (Öko-Institut et al., 2020)

4.3 Szenario Cost-Sensitive-Entscheider Agent

Abbildung 19 zeigt die Entwicklung des Endenergieverbrauchs für Gebäudewärme mit einem Cost-Sensitive-Entscheider-Agenten bei den selbstnutzenden Eigentümern. Marktrestriktionen und Einflüsse sind in dem Szenario nicht berücksichtigt. Der Endenergieverbrauch reduziert sich im Zeitraum 2018 bis 2030 um 8,5 Prozent, bis 2050 um 34,2 Prozent. Mit Bezug auf die eingesetzten Energieträger führen die simulierten Investitionsentscheidungen unter den angenommenen Rahmenbedingungen zur Energiepreisentwicklung zu einer deutlichen Verschiebung von Erdgas zu Wärmepumpen (Umgebungswärme und Strom WP) und auch Biomassekesseln. Der Anteil fossiler Heizkessel mit Erdgas und Heizöl an der Wärmeerzeugung liegt im Jahr 2050 bei 9,8 Prozent, Wärmepumpen haben einen Anteil von 42,8 Prozent. Auch der Anteil der kombinierten Anlagen mit Solarthermie wächst deutlich und beträgt im Jahr 2050 rund 9,7 Prozent.

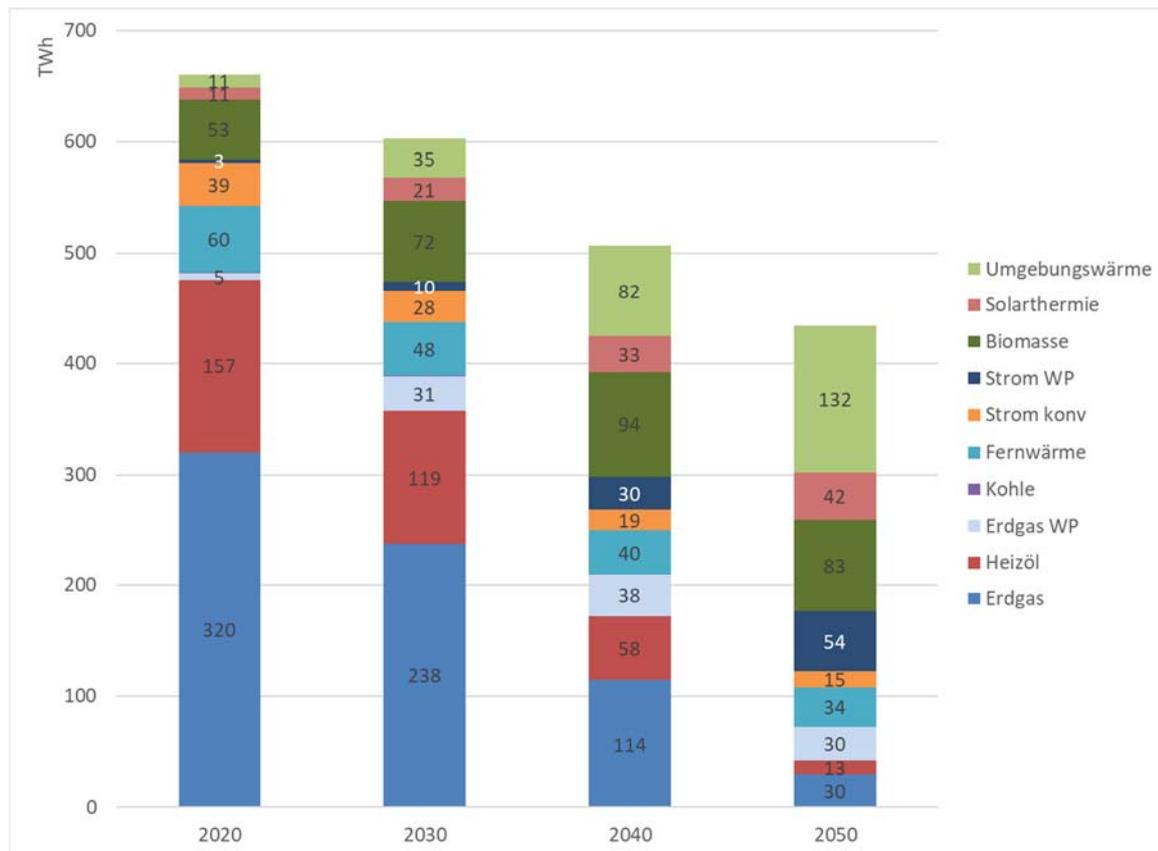


Abbildung 19: Entwicklung des Endenergieverbrauchs für Raumwärme und Warmwasser in Wohngebäuden und Nichtwohngebäuden (GHD) im Szenario Cost-Sensitive ohne Marktrestriktionen

Analyse der simulierten Investitionsentscheidung in Energieeffizienzmaßnahmen

Um das Ergebnisse mit Bezug auf die gewählten Energieeffizienzmaßnahmen in der simulierten Sanierungsentscheidung des Entscheider-Agenten zu analysieren, zeigt Abbildung 20 die resultierenden Nutzwerte im Modell aggregiert auf Ebene der im ersten Simulationsjahr sanierten Gebäudeklassen des Entscheider-Agenten. Diese sind im Modell umgekehrt skaliert, wodurch ein niedrigerer Wert ein höherer Nutzen für den Entscheider-Agenten bedeutet. Die Gebäudeklassen sind wie in Kapitel 2.2 differenziert nach Gebäudetyp, Gebäudealter und nachträglich erfolgter Sanierung. Es zeigt sich, dass unter den gegebenen Sanierungspaketen als alternative Optionen die Nutzwerte für Standard EnEV Sanierung und KfW 100 Sanierung sehr nahe beieinander liegen. Die reine Instandsetzungsoption ohne energetische Einsparung ordnet sich in allen Gebäudeklassen in ähnlicher Größenordnung ein, während die Bewertung der ambitioniertes Sanierung nach KfW 55 Standard vom Zustand des Gebäudes abhängt. Ein hoher Nutzwert zeigt sich in den alten Gebäuden, die bisher gar nicht oder nur wenig (Fenster austausch) saniert wurden.

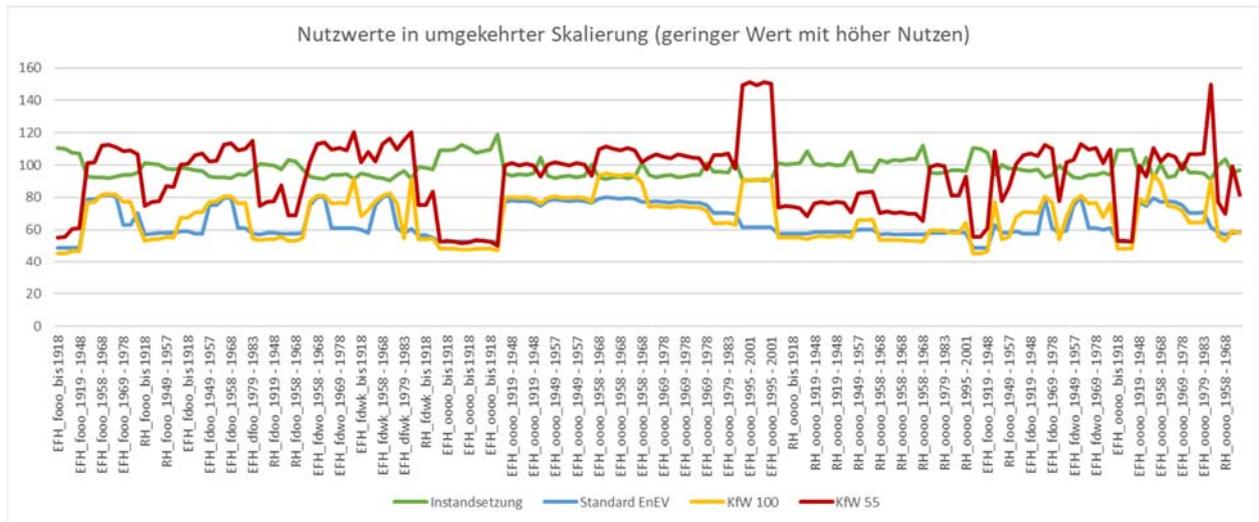


Abbildung 20: Nutzwerte der Sanierungsoptionen des Cost-Sensitive Entscheider-Agenten nach Gebäudeklassen im ersten Simulationsjahr

Erklärung: EFH = Ein- und Zweifamilienhaus freistehend, RH = Reihenhaus/ Doppelhaus; oooo= Alle Bauteile entsprechen energetisch im Ausgangszustand zum Zeitpunkt der Erstellung des Gebäudes; f = Fenster nachträglich bereits ausgetauscht, d= Dach nachträglich bereits gedämmt, w= Außenwand bereits nachträglich gedämmt, k= Kellerdecke bereits nachträglich gedämmt; Gebäudeklassen sind entsprechend der Baualters sortiert, Aufgrund der Lesbarkeit sind nicht alle Bezeichnungen der Gebäudeklassen im Diagramm aufgeführt

Inwieweit die Nutzwerte in simulierte Marktanteile durch das implementiert Logit-Modells überführt werden, zeigt Abbildung 21. Standard EnEV Sanierung und KfW 100 Sanierung haben die höchsten Marktanteile und verdrängen dort aufgrund des deutlichen Abstands im Gesamtnutzwert sowohl das Instandsetzungs-, als auch das ambitionierte Sanierungspaket. Der Abstand zur Instandsetzungsoption ist nur in einigen Gebäudesegmenten näher, in denen dann auch entsprechende Wahlwahrscheinlichkeit bis maximal 20 Prozent im Modell resultieren. Die KfW 55 Sanierung kommt nur in den oben erwähnten wenigen Segmenten zum Zuge in denen der Nutzwert im Bereich der Standard Sanierung liegt.

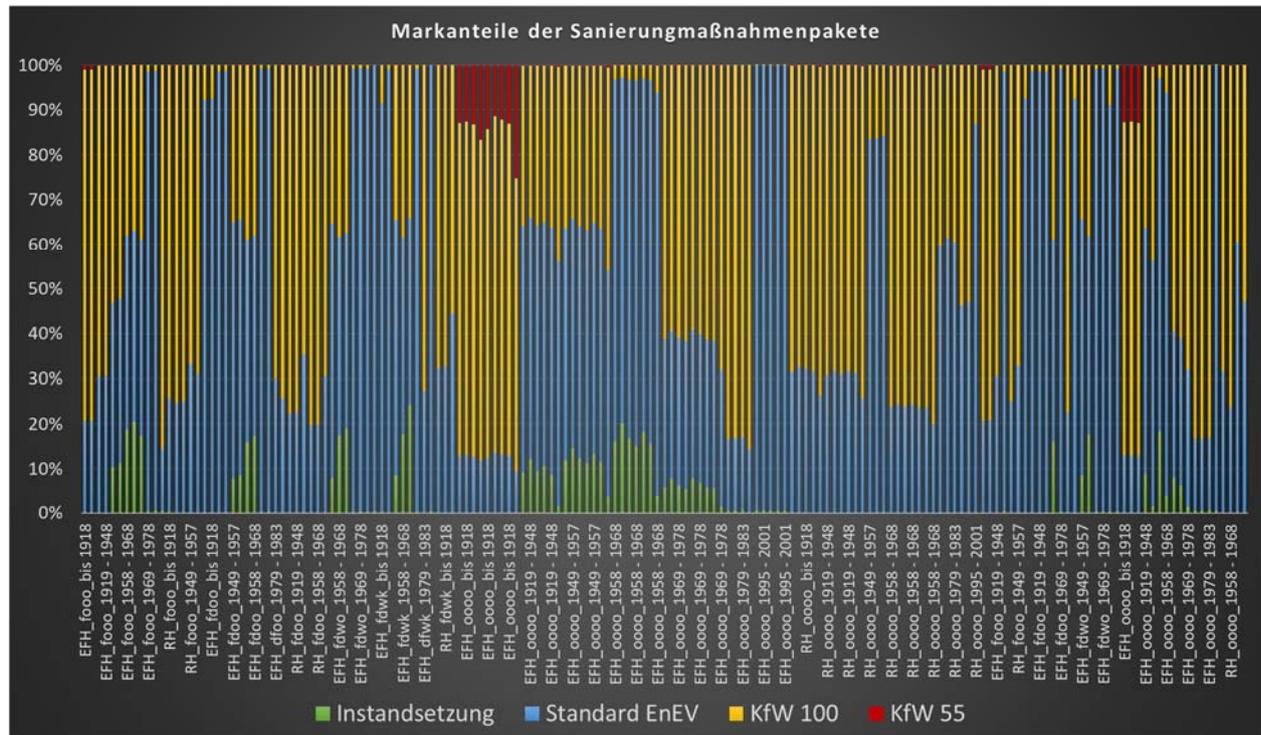


Abbildung 21: Simulierte Marktanteile der im Modell abgebildeten Sanierungspakete im ersten Simulationsjahr des Cost-Sensitive Entscheider-Agent

Erklärung: EFH = Ein- und Zweifamilienhaus freistehend, RH = Reihenhaus/ Doppelhaus; oooo= Alle Bauteile entsprechen energetisch im Ausgangszustand zum Zeitpunkt der Erstellung des Gebäudes; f = Fenster nachträglich bereits ausgetauscht, d= Dach nachträglich bereits gedämmt, w= Außenwand bereits nachträglich gedämmt, k= Kellerdecke bereits nachträglich gedämmt; Gebäudeklassen sind entsprechend der Baualters sortiert, Aufgrund der Lesbarkeit sind nicht alle Bezeichnungen der Gebäudeklassen im Diagramm aufgeführt

Analyse der simulierten Investitionsentscheidungen in Wärmeversorgungssysteme

Um die Investitionsentscheidungen in Wärmeversorgungssysteme zu analysieren, sind im Folgenden die resultierenden Marktanteile für den *Cost-Sensitive Entscheider-Agenten* über alle dem Agenten zugewiesenen Referenzgebäudesegmente dargestellt. Abbildung 22 zeigt die Anzahl der neu installierten Heizsysteme im Jahr 2020 als Stützjahr für den Anfang der Simulationsperiode. Zu beachten ist dabei, dass durch das installierte Wärmeverteilsystem in manchen Referenzgebäudesegmenten die Auswahl der möglichen Technologieoptionen eingeschränkt ist. Bei Gebäuden ohne zentralem Verteilsystem können nur Einzelraumheizungen installiert werden. Im Modell sind dazu Erdgas-, Heizöl- und Holzeinzelraumheizungen hinterlegt (vgl. 2.2). Der Umstieg der betroffenen Referenzgebäudesegmente auf zentrale Wärmeverteilsysteme erfolgt im Modell nur, wenn bei der Sanierungsentscheidung für die Gebäude ein ambitioniertes Sanierungspaket (KfW 100, KfW 55) gewählt wird. Bei den simulierten Marktanteilen haben die fossilen Heiztechnologien in Kombination mit Solarthermie zusammen den höchsten Anteil. Der Erdgas-Brennwertkessel mit Solarthermie hat einen Anteil von 24 Prozent an den neu installierten Technologien des Entscheider-Agenten, der Heizöl-Brennwertkessel in Kombination mit Solarthermie einen Anteil von 12 Prozent. Bei den primären Wärmeversorgungssystemen mit erneuerbaren Energien hat die Luft/Wasser-Wärmepumpe mit 13 Prozent den höchsten Anteil. Auch die Gaswärmepumpe hat einen relativ hohen Anteil mit 9 Prozent für eine noch sehr innovative Technologie. Hier zeigt sich, dass Markt- und Diffusionsbeschränkungen noch nicht berücksichtigt sind, da die Gaswärmepumpe derzeit nur von wenigen Herstellern und dementsprechend auch wenigen Installateuren angeboten wird.

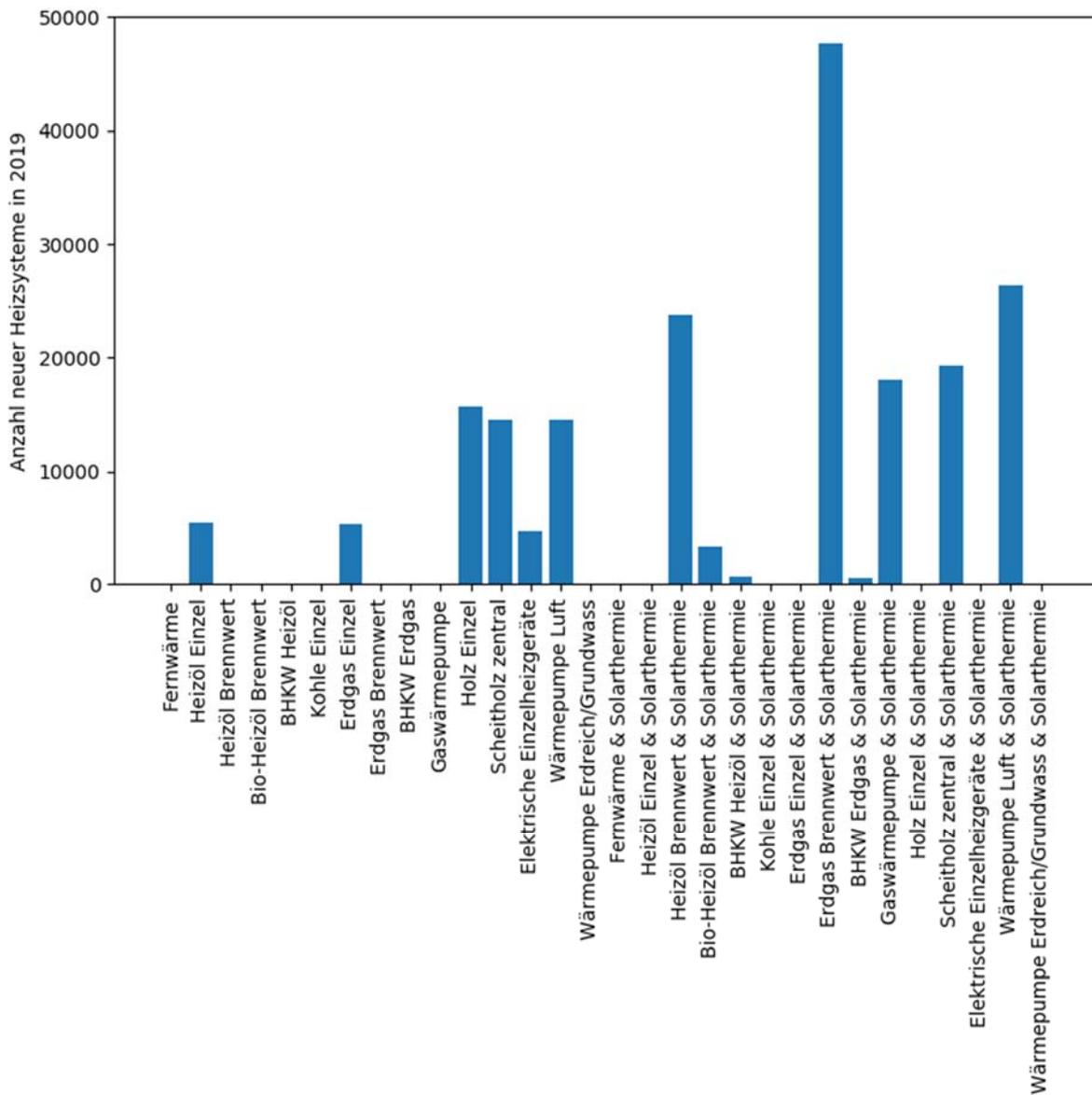


Abbildung 22: Anzahl neu installierter Heizsysteme des Cost-Sensitive-Entscheider-Agenten im Jahr 2020

Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden. zeigt die Veränderung der simulierten Marktanteile für den Cost-Sensitive-Entscheider-Agent im Jahr 2030 und damit wie sich die Entscheidungen bis dahin ändern. Dies ist insbesondere auf die veränderte Gebäudestruktur durch Sanierungsmaßnahmen und Neubauten, die Entwicklung der Energiepreise sowie die Veränderungen anderen Politikmaßnahmen wie dem Verbot von monovalenten Heizölkesseln zurückzuführen. Die Kombination aus Erdgas-Brennwertkessel und Solarthermie hat immer noch den höchsten Anteil, allerdings werden bereits fast im gleichen Anteil Wärmepumpen installiert.

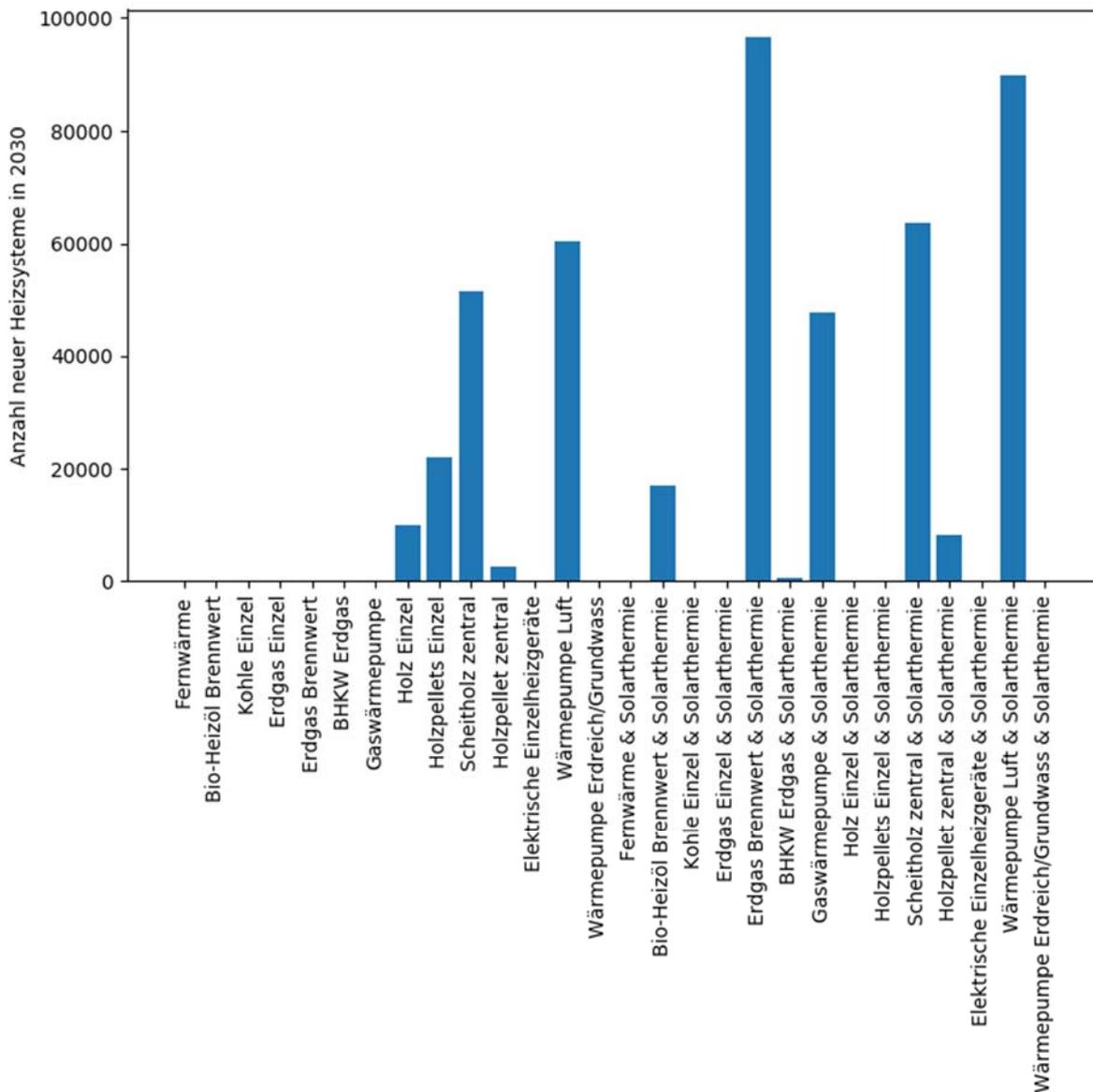


Abbildung 23: Anzahl neu installierter Heizsysteme des Cost-Sensitive-Entscheider-Agenten im Jahr 2030

Die Veränderungen bis zum Jahr 2050 sind noch deutlicher zu sehen (Abbildung 24). Hier sind fast alle neu installierten Wärmeversorgungssysteme des Cost-Sensitive-Entscheider Agenten Wärmepumpen. Da das Attribut Energiekosteneinsparung sehr hoch bewertet wird und gleichzeitig die Höhe der Investitionen eine hohe Relevanz hat, haben Luft/Wärmepumpen mit Abstand die höchsten Marktanteile. Die fossilen Energiepreise steigen durch die Annahmen eines hohen CO₂-Preises für Wärme in Gebäuden im Rahmen des BEHG bis 2050 stark an, während die EEG-Umlage und damit der Strompreis absinkt. Gleichzeitig nimmt durch Sanierungsmaßnahmen und die damit verbundene Absenkung der Vorlauftemperaturen der Anteil der Gebäude zu, die einen effizienten Einsatz von Wärmepumpen erlauben. Erdwärmepumpen werden hingegen kaum gezogen, da diese mit Abstand die höchsten Investitionen aller Technologieoptionen bedeuten.

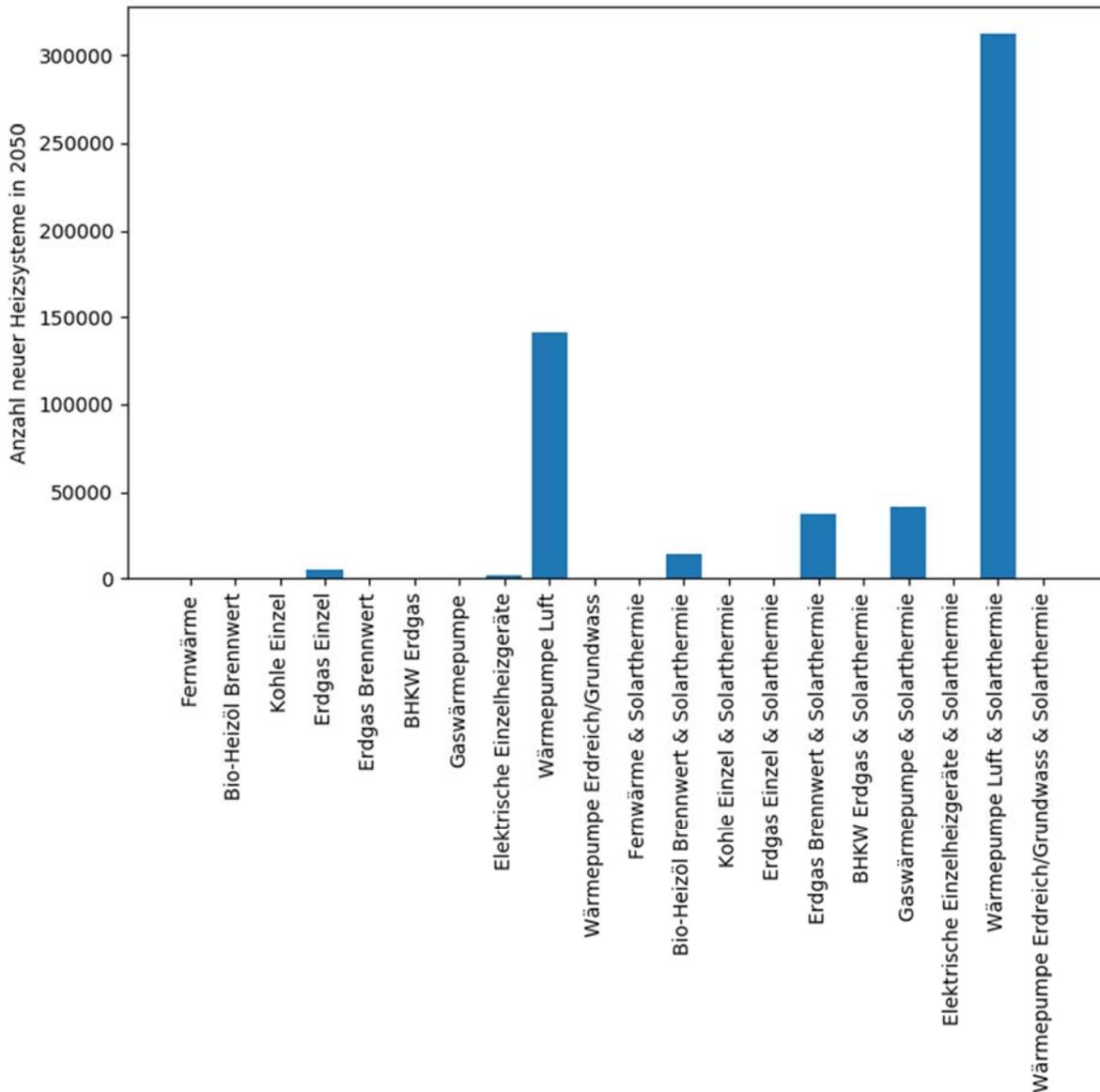


Abbildung 24: Anzahl neu installierter Heizsysteme des Cost-Sensitive-Entscheider-Agenten im Jahr 2050

4.4 Szenario Source-Sensitive-Entscheider Agent

Abbildung 25 zeigt die Entwicklung des Endenergieverbrauchs für Gebäudewärme mit einem Source-Sensitive-Entscheider-Agenten bei den selbstnutzenden Eigentümern. Marktrestriktionen und Einflüsse sind in dem Szenario ebenfalls noch nicht berücksichtigt. Der Endenergieverbrauch reduziert sich im Zeitraum 2018 bis 2030 um 7,8 Prozent, bis 2050 um 32,2 Prozent. Im Vergleich zum Szenario mit dem *Cost-Sensitive-Entscheider-Agenten* für den Bereich der selbstnutzenden Eigentümer liegt der Endenergieverbrauch im Jahr 2050 um 12 TWh höher. Über den Simulationszeitraum von 2008 bis 2050 beträgt der Unterschied 211 TWh.

Mit Bezug auf die eingesetzten Energieträger führen die simulierten Investitionsentscheidungen zu einem ähnlichen Bild im Jahr 2050 mit einer deutlichen Verschiebung von Erdgas zu Wärmepumpen (Umgebungswärme und Strom WP) und auch Biomassekesseln. Der Anteil fossiler Heizkessel mit Erdgas und Heizöl an der Wärmeerzeugung liegt im Jahr 2050 bei 11,6 Prozent und damit etwas höher als im Szenario mit dem Cost-Sensitive-Entscheider-Agenten. Der Unterschied bei den Wärmepumpen ist mit einem Anteil von 41,4 Prozent etwas geringer. Der Anteil von Solarthermie ist mit 10,3 Prozent hingegen etwas höher.

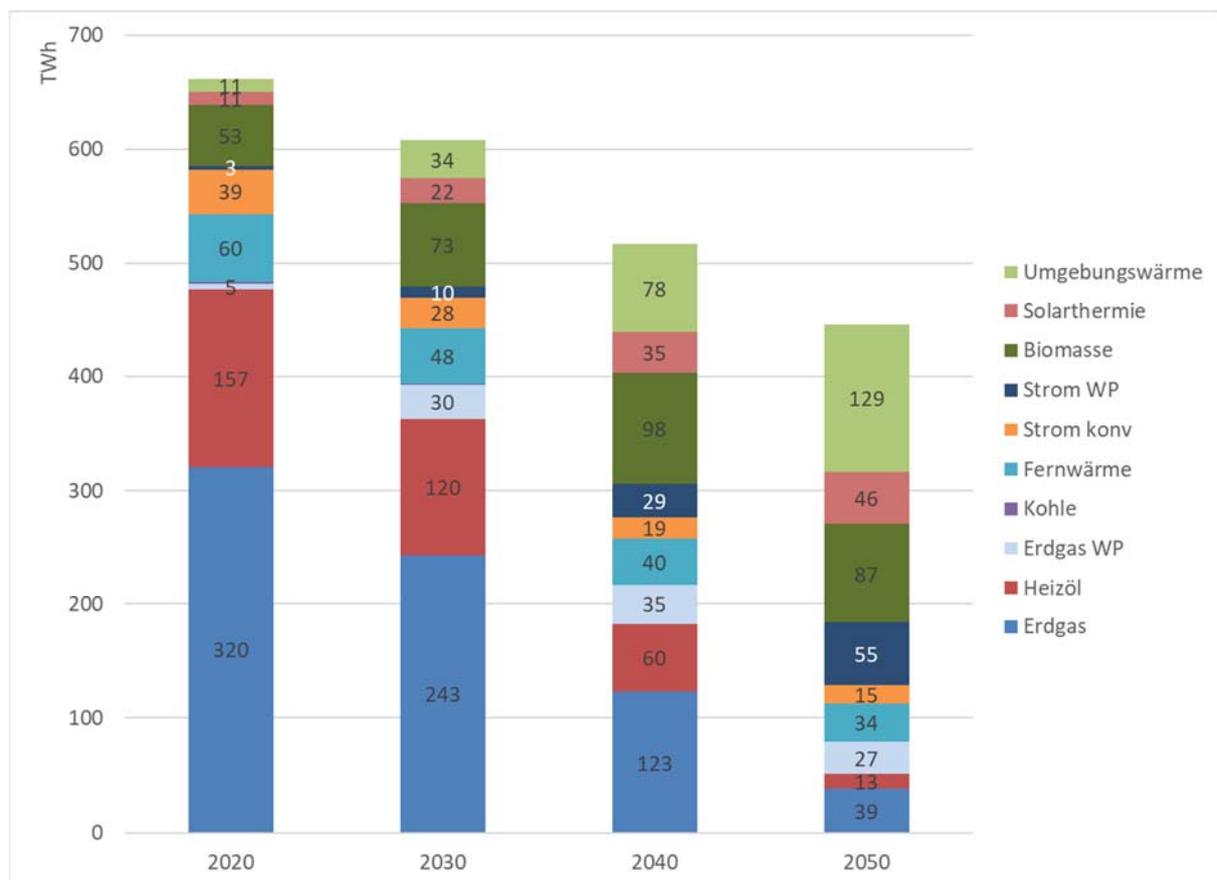


Abbildung 25: Entwicklung des Endenergieverbrauchs für Raumwärme und Warmwasser in Wohngebäuden und Nichtwohngebäuden (GHD) im Szenario Source-Sensitive ohne Marktrestriktionen

Analyse der simulierten Entscheidungssituation in Energieeffizienzmaßnahmen

Der Vergleich der resultierenden Gesamtnutzwerte des Source-sensitive Entscheider-Agenten mit dem Cost-Sensitive Entscheider-Agenten verdeutlicht die Unterschiede im resultierenden Rückgang des Endenergieverbrauchs aufgrund der individuellen Entscheidungskriterien. Die Instandsetzungsoption liegt im mittleren Bereich über alle Gebäudeklassen und hat in einigen Gebäudeklassen den höchsten Gesamtnutzwert, da der Entscheider-Agent mehr Relevanz auf die Höhe der Investitionen (Sanierungskosten) legt. Diese Unterschiede zwischen den Entscheider-Agenten gleichen sich über die Simulationsperiode aus, da aufgrund der höheren Energiepreise und damit verbundenen Energiekosten, die Relevanz der

Energiekosteneinsparung gegenüber den Sanierungskosten für den Source-sensitive Entscheider-Agenten zunimmt.

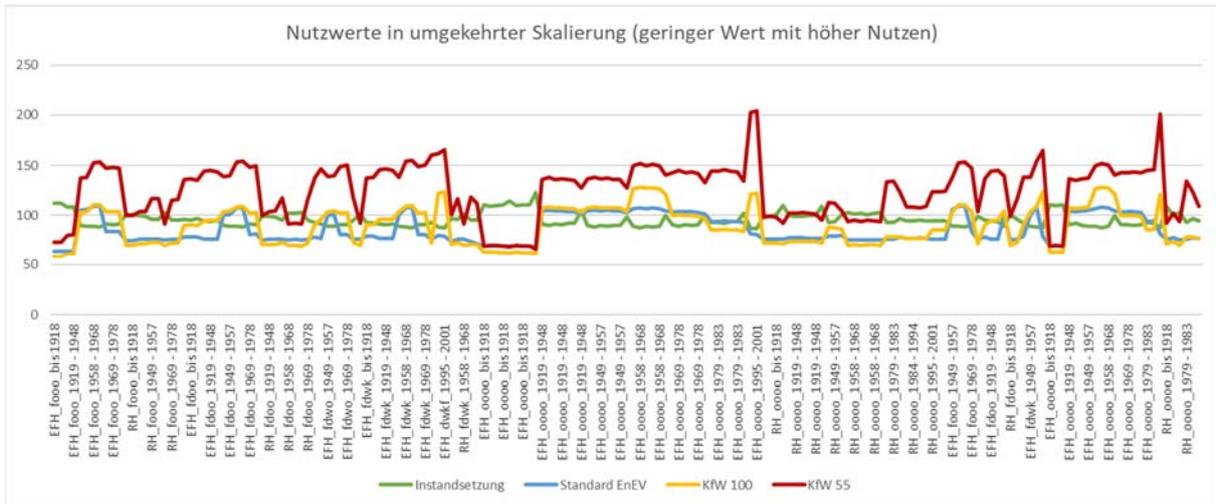


Abbildung 26: Nutzwerte der Sanierungsoptionen des Source-Sensitive Entscheider-Agenten nach Gebäudeklassen im ersten Simulationsjahr

Die resultierenden Marktanteile für den Entscheider-Agenten zeigen, dass die Instandsetzungsoption nicht nur in mehr Gebäudesegmente gewählt wird, sondern auch in einen höheren Marktanteil bis zu 90 Prozent resultiert.

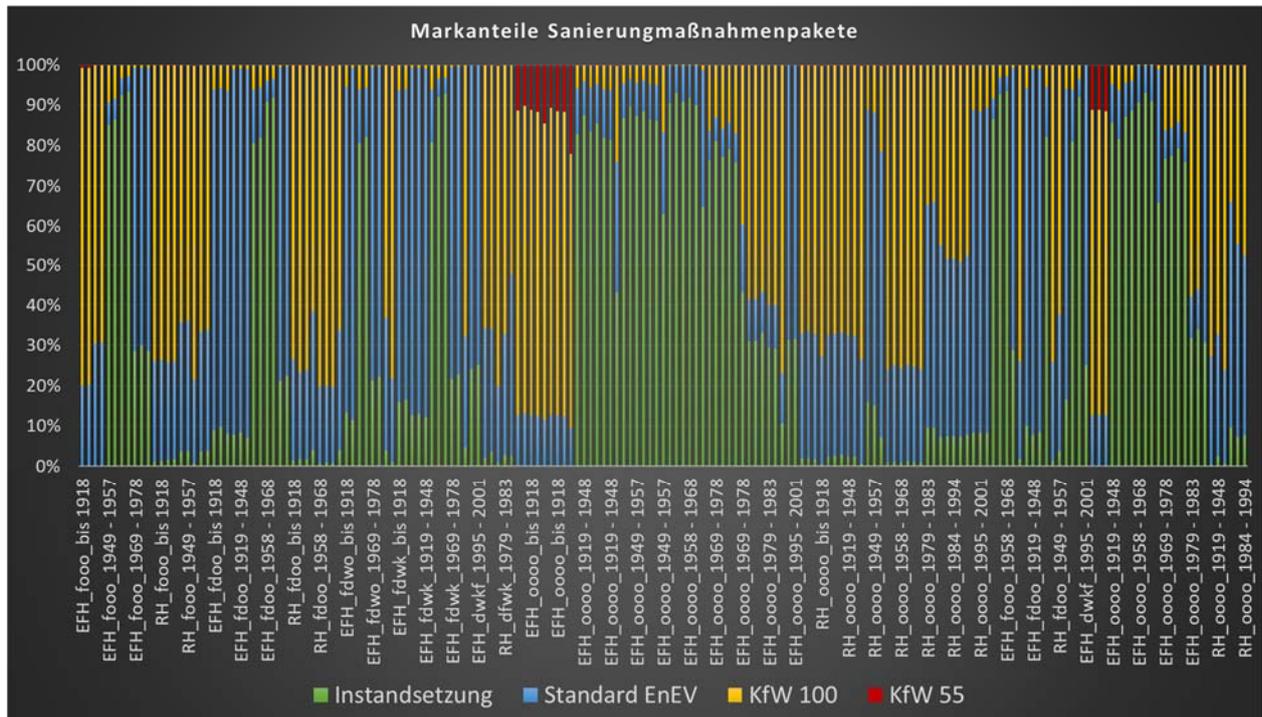


Abbildung 27: Simulierte Marktanteile der im Modell abgebildeten Sanierungspakete im ersten Simulationsjahr des Cost-Sensitive Entscheider-Agent

Analyse der simulierten Entscheidungssituation in Wärmeversorgungssysteme

Die simulierten Marktanteile des Source-Sensitive-Entscheider-Agenten für das Jahr 2020 sind in Abbildung 28 dargestellt. Im Vergleich zum Cost-Sensitive-Entscheider-Agenten zeigen sich Unterschiede in den gewählten Technologien und Marktanteilen, jedoch ist die Tendenz eine ähnliche mit hohen Anteilen Erdgas-Brennwert in Kombination mit Solarthermie.

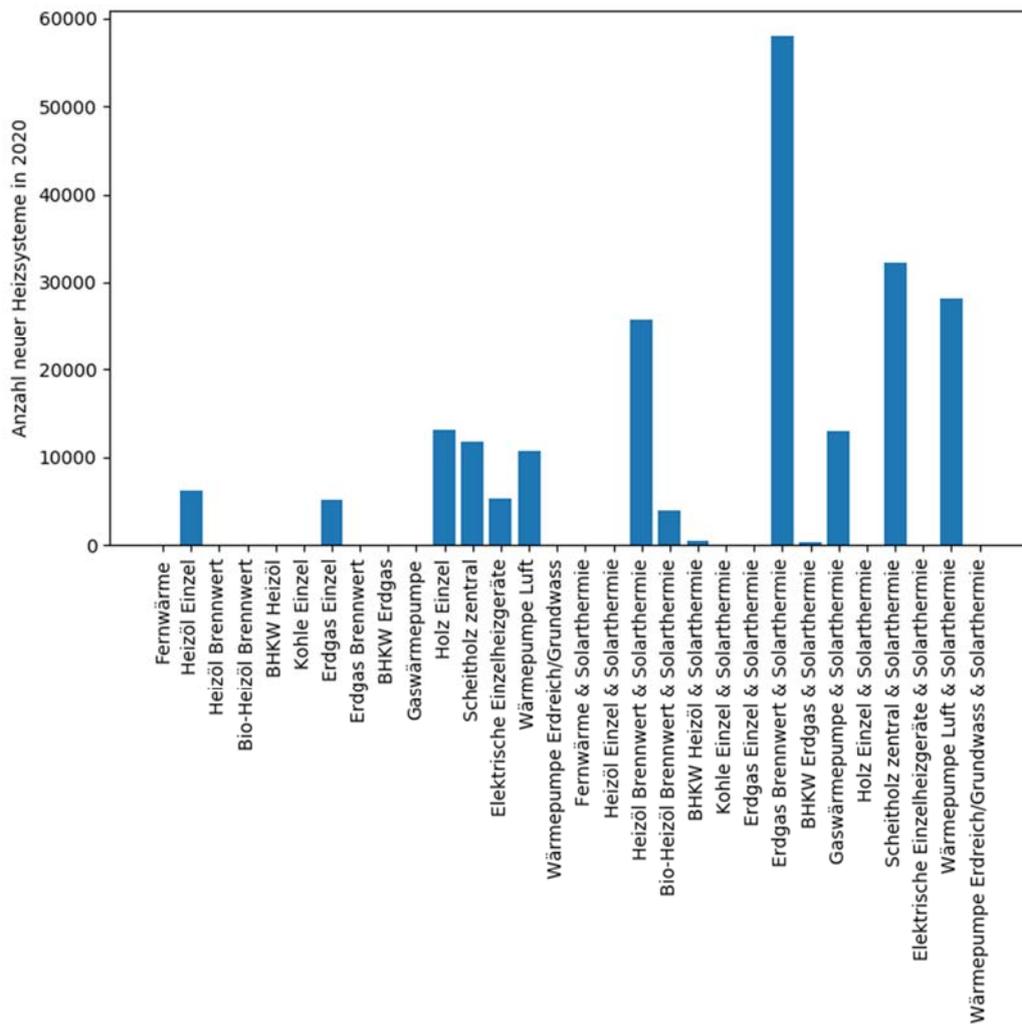


Abbildung 28: Anzahl neu installierter Heizsysteme des Source-Sensitive-Entscheider-Agenten im Jahr 2020

Im Jahr 2030 zeigen sich deutlichere Unterschiede. Hier haben beim Source-Sensitive-Entscheider-Agenten die Marktanteile der erneuerbaren Energien Wärmetechnologien insgesamt einen geringeren Anteil, als beim Cost-Sensitive-Entscheider-Agenten. Bei diesem sind bereits nur die Marktanteile der Wärmepumpentechnologien höher als die Summe der Marktanteile der fossilen Technologien. Auch ist der Anteil der Gaswärmepumpe beim Source-Sensitive-Entscheider-Agenten niedriger.

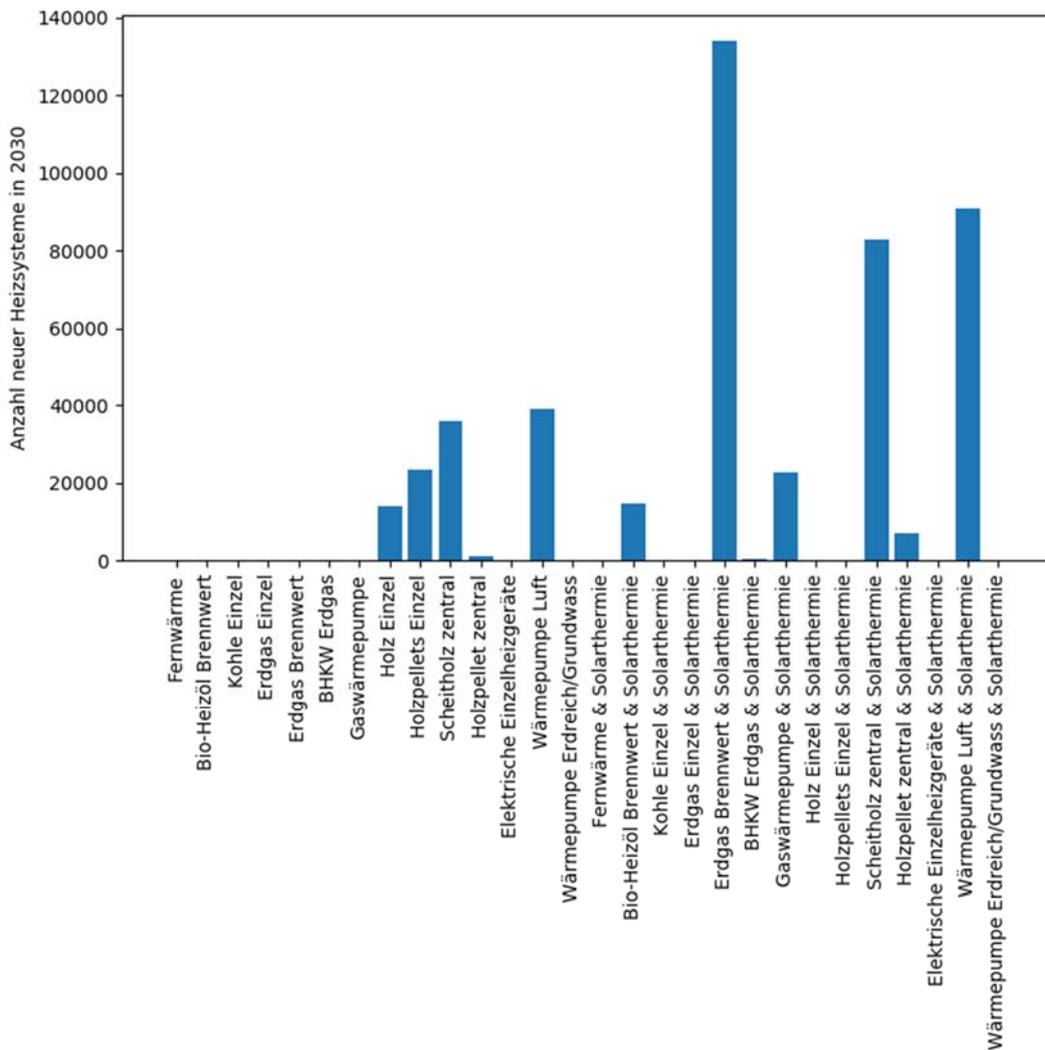


Abbildung 29: Anzahl neu installierter Heizsysteme des Source-Sensitive-Entscheider-Agenten im Jahr 2030

Im Jahr 2050 nähern sich die simulierten Entscheidungsmuster der beiden Agenten wieder an mit einem dominierenden Anteil an Luft/Wärmepumpen auch bei *Source-Sensitive-Entscheider-Agenten*.

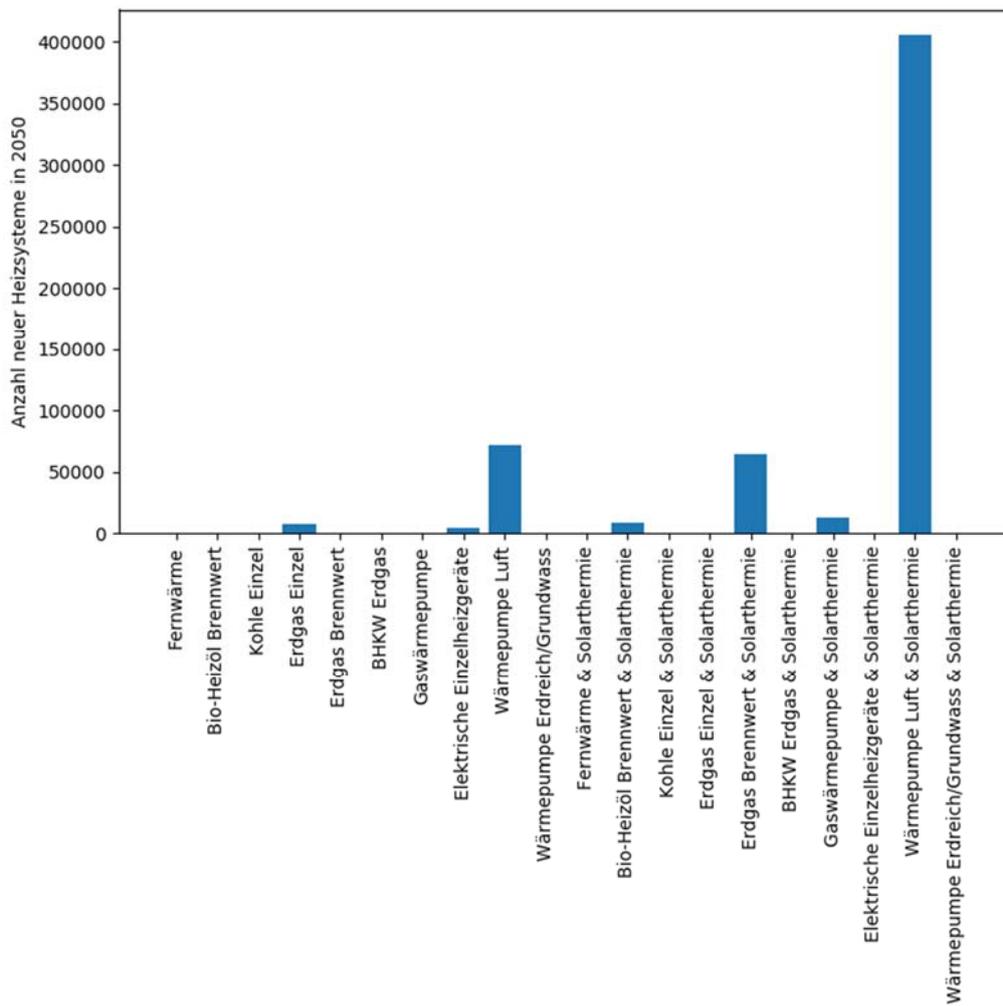


Abbildung 30: Anzahl neu installierter Heizsysteme des Source-Sensitive-Entscheider-Agenten im Jahr 2050

4.5 Vergleichsszenario Rationaler-Entscheider-Agent

Abbildung 31 zeigt die Ergebnisse des Vergleichsszenarios mit einem umfanglich informieren Entscheider-Agenten, der ökonomisch rational entscheidet. Der Endenergieverbrauch reduziert sich in der Simulationsperiode bis 2030 um 9 Prozent und bis 2050 um 36 Prozent auf 421 TWh. Damit liegt der Endenergieverbrauch im Jahr 2050 um 12,2 TWh niedriger als im Szenario mit dem *Cost-Sensitive-Entscheider-Agent* und um 24,2 TWh niedriger als im Szenario mit dem *Source-Sensitive-Entscheider-Agent*.

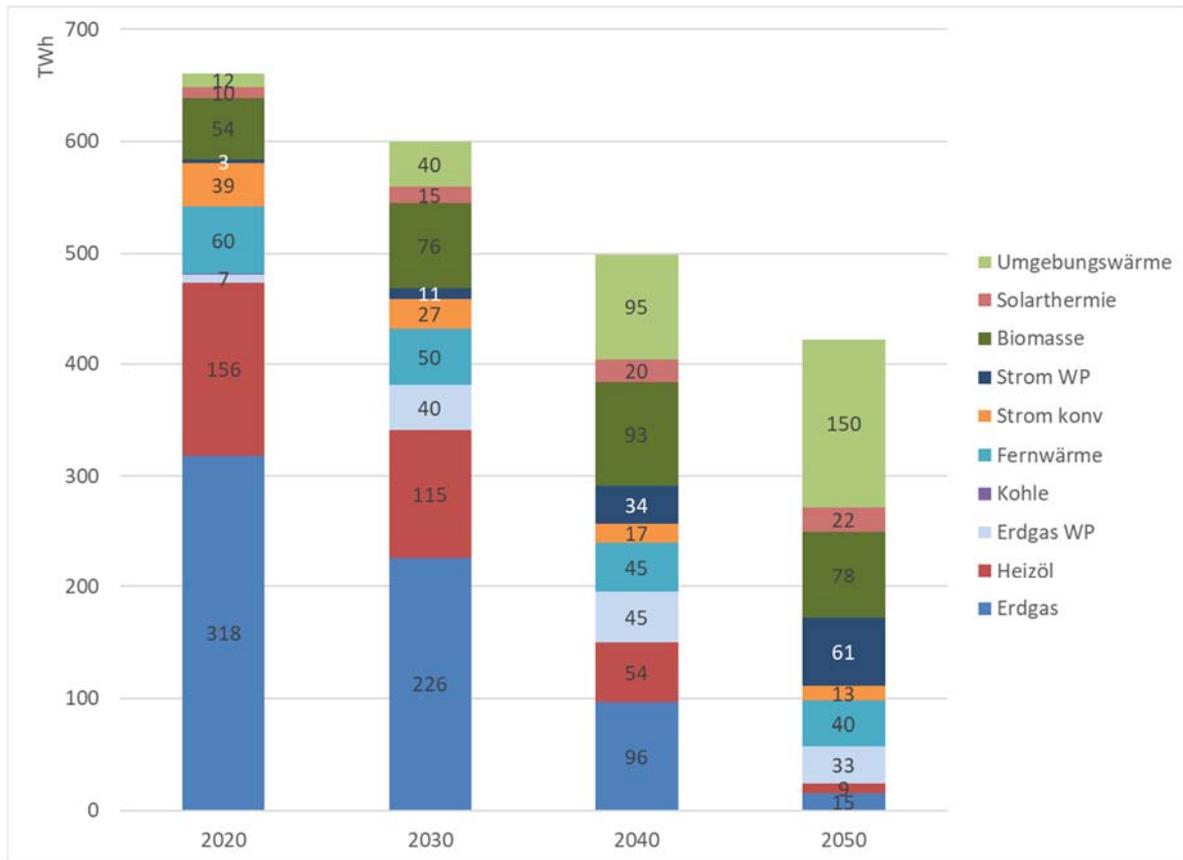


Abbildung 31: Entwicklung des Endenergieverbrauchs für Raumwärme und Warmwasser in Wohngebäuden und Nichtwohngebäuden (GHD) im Szenario Rationaler-Entscheider-Agent ohne Marktrestriktionen

Analyse der simulierten Entscheidungssituation in Energieeffizienzmaßnahmen

Die Gesamtnutzwerte mit Bezug auf die Sanierungsoptionen liegen bei dem Entscheider-Agenten in den meisten Gebäudeklassen näher beieinander. Da unterstellt wird, dass der Agent umfassende Informationen hat und die Anforderungen des GEG bei umfänglicher Sanierung berücksichtigt, wird die reine Instandsetzungsoption nicht bei der Investitionsentscheidung einbezogen.

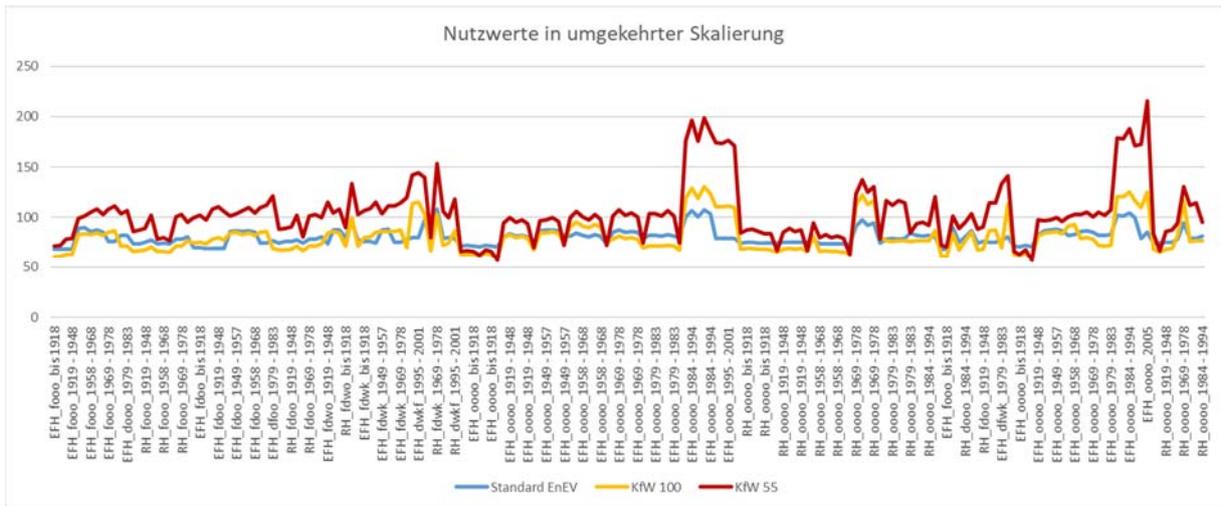


Abbildung 32: Nutzwerte der Sanierungsoptionen des Rational-Entscheider-Agenten nach Gebäudeklassen im ersten Simulationsjahr

Bei den simulierten Marktanteilen zeigt sich insgesamt ein höherer Marktanteil für KfW-Sanierungen als für Standard Sanierungen.

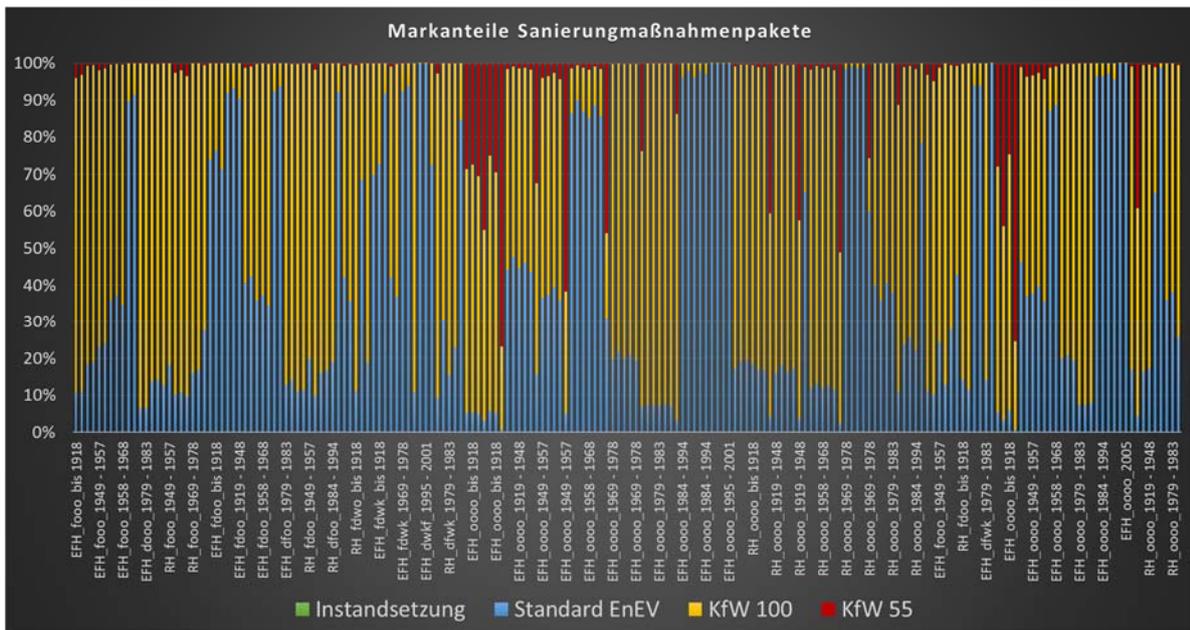


Abbildung 33: Simulierte Marktanteile der im Modell abgebildeten Sanierungsmaßnahmenpakete im ersten Simulationsjahr des Rationaler-Entscheider-Agent

Analyse der simulierten Entscheidungssituation in Wärmeversorgungssysteme

Bei den Marktanteilen der Wärmeversorgungssysteme zeigt sich auch ein deutlich anderes Bild. Für das Jahr 2020 haben die Gaswärmepumpe, der Scheitholzessel und die Luft/Wasser Wärmepumpe den

höchsten Marktanteil. Für das Jahr 2030 zeigen sich keine großen Veränderungen in den Marktanteilen (siehe Anhang).

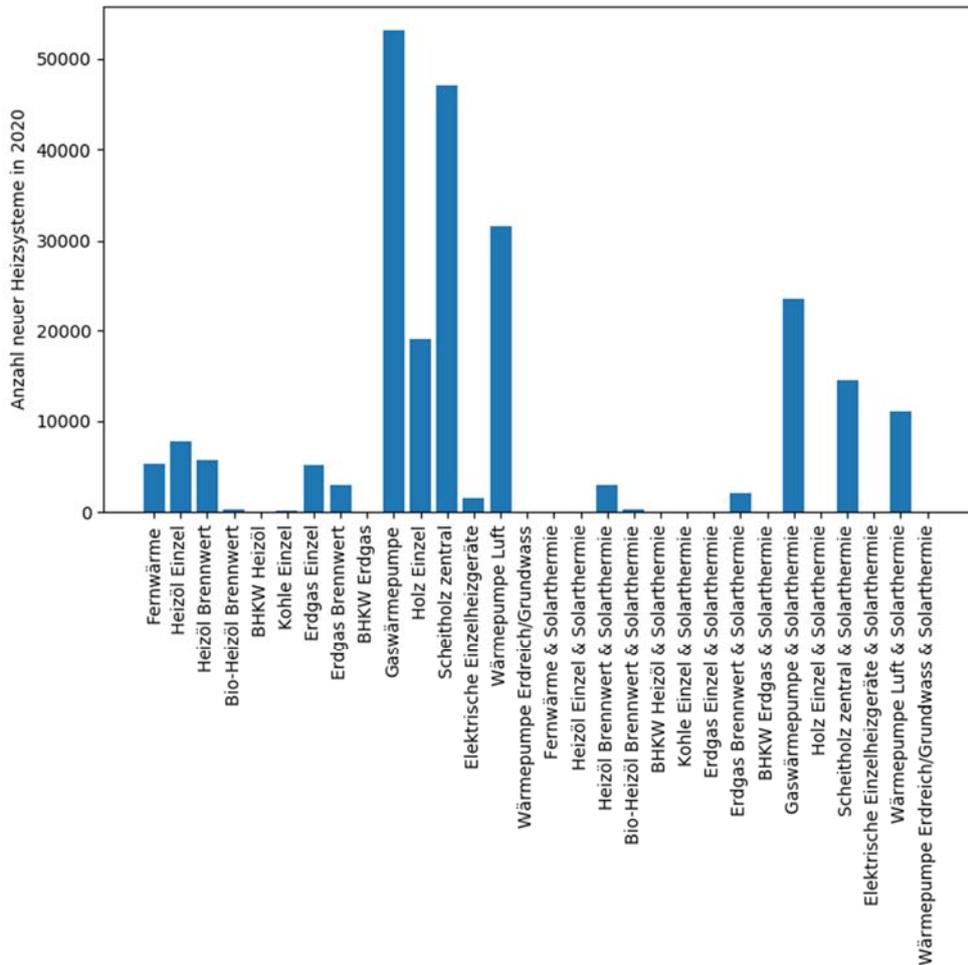


Abbildung 34: Anzahl neu installierter Heizsysteme des Rationalen-Entscheider-Agenten im Jahr 2020

Im Jahr 2050 fokussieren sich die Marktanteile ebenfalls auf den Luft/Wasser Wärmepumpen, was auch noch mal bestätigt, dass der CO₂-Preisfad in Kombination mit den Sanierungsaktivitäten zu einer

Transformation zu Wärmepumpentechnologien bei allen Entscheider-Agenten führt. Allerdings konzentrieren sich die Marktanteile hier im Gegensatz zu den Cost-Sensitive und dem Source-Sensitive-Entscheider-Agenten auf die Wärmepumpen ohne Kombination mit Solarthermie.

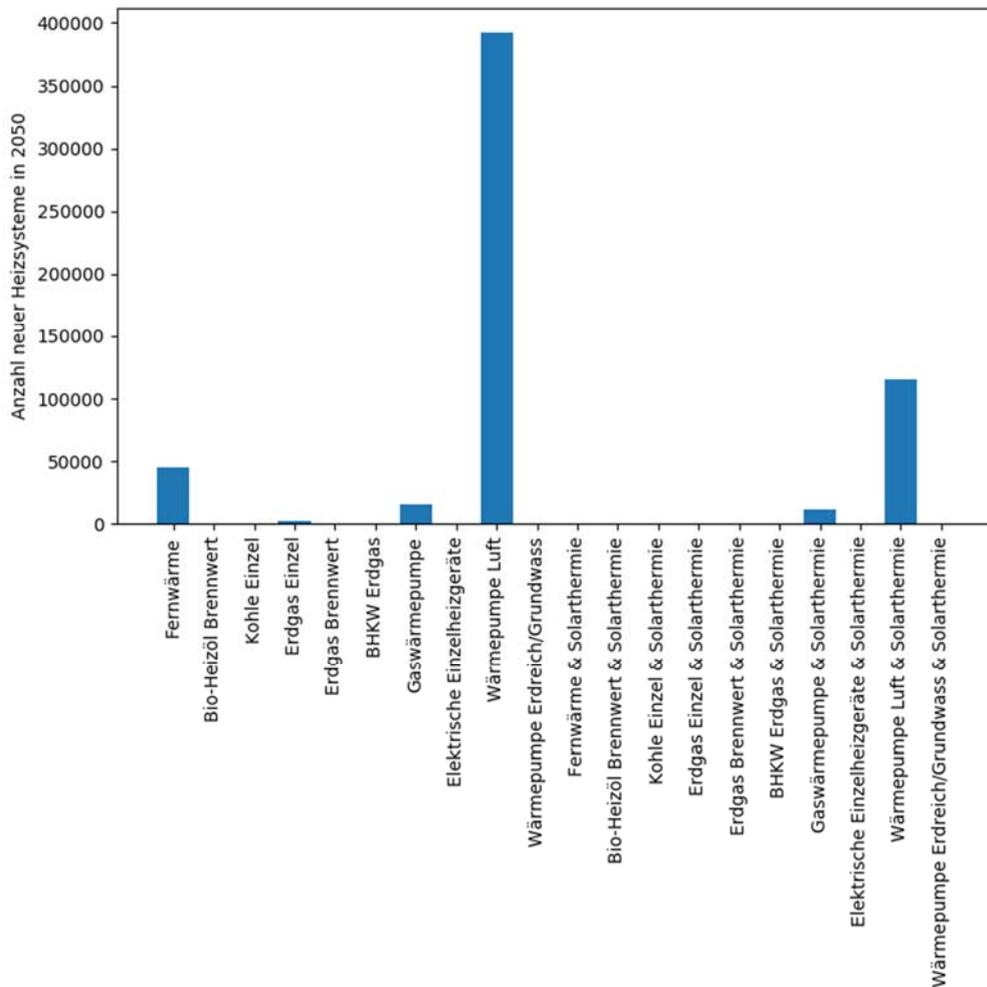


Abbildung 35: Anzahl neu installierter Heizsysteme des Rationalen-Entscheider-Agenten im Jahr 2050

4.6 Vergleichsszenario Instandsetzer-Entscheider-Agent

Das weitere Vergleichsszenario soll die Ergebnisse unter der Annahme eines generischen Entscheider-Agenten beleuchten, der eine „Instandsetzung-Strategie“ verfolgt und die Relevanz in der Entscheidungsfindung auf die Höhe der notwendigen Investitionen legt. Die Entwicklung des Endenergieverbrauchs zeigt, dass eine deutliche geringer Effizienzpfad eingeschlagen wird, so dass bis im Zeitraum von 2018 bis 2050 für den gesamten Gebäudebereich nur ein Rückgang von 28,5 Prozent realisiert werden kann.

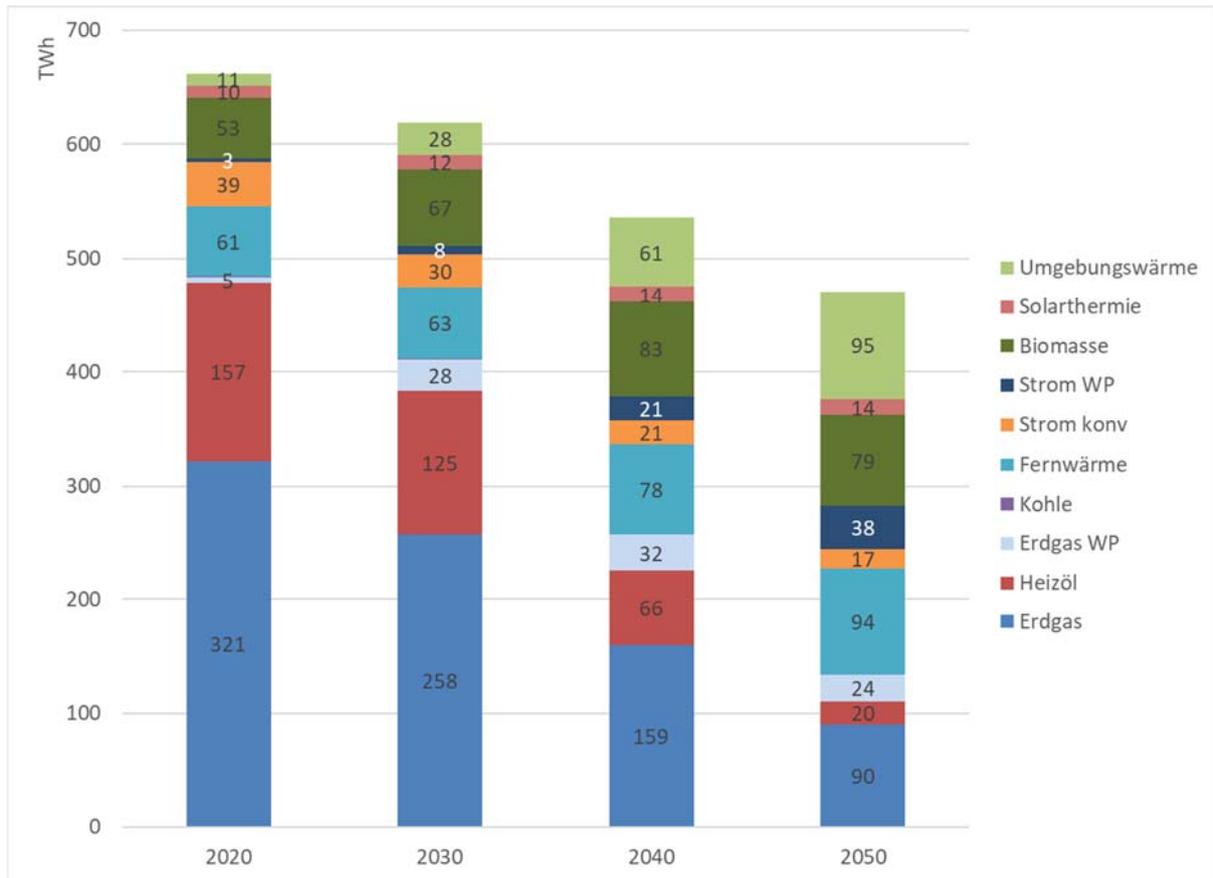


Abbildung 36: Entwicklung des Endenergieverbrauchs für Raumwärme und Warmwasser in Wohngebäuden und Nichtwohngebäuden (GHD) im Szenario Instandsetzer-Entscheider-Agent ohne Marktrestriktionen

Analyse der simulierten Entscheidungssituation in Energieeffizienzmaßnahmen

Die Analyse der Nutzwerte und der simulierten Marktanteile für das Jahr 2019 verdeutlichte, dass mit dem gewählten Entscheidungskriterien eine Instandsetzungsstrategie verfolgt wird. In fast allen Gebäudesegmenten wird dem Sanierungspaket Instandsetzung, welches keine energetische Sanierungsmaßnahmen beinhaltet, die gesamten Marktanteile zugeschrieben.

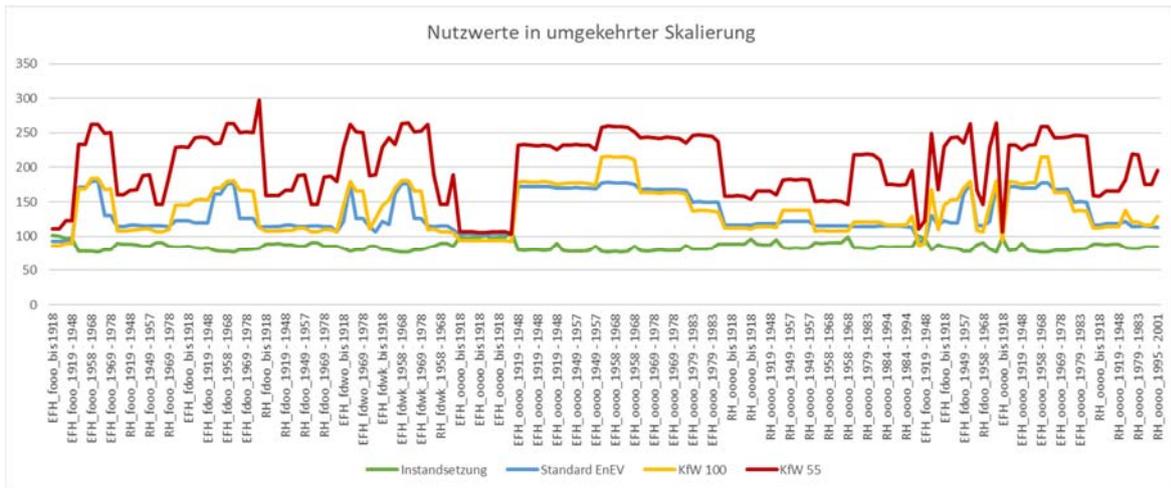


Abbildung 37

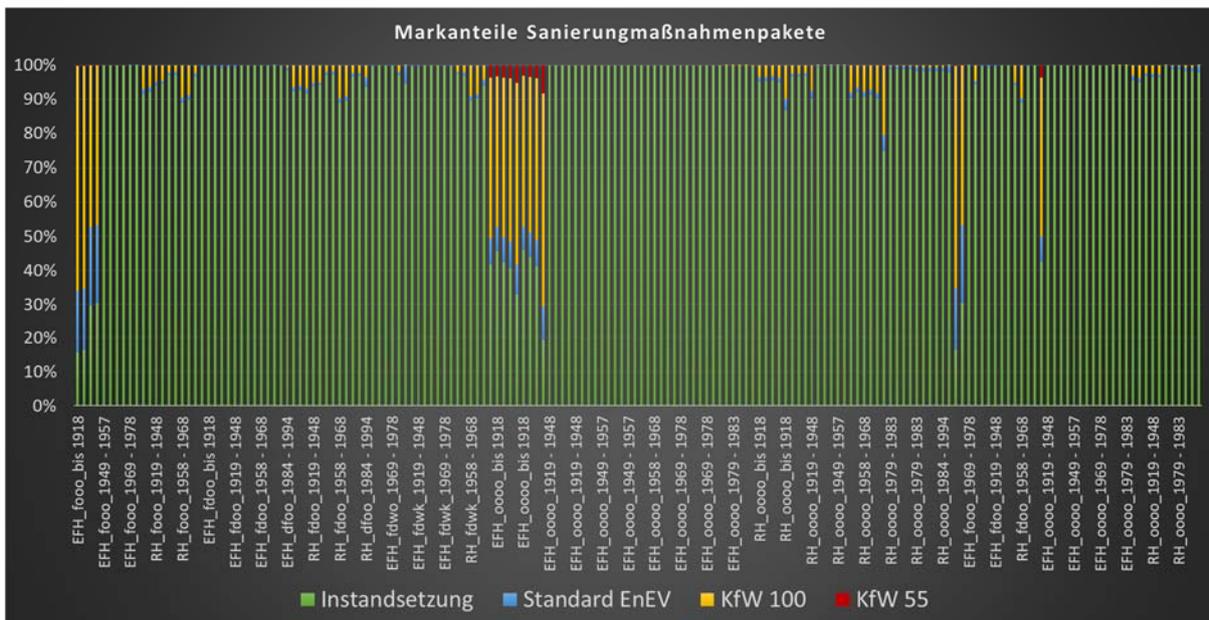


Abbildung 38: Simulierte Marktanteile der im Modell abgebildeten Sanierungspakete im ersten Simulationsjahr des Instandsetzer-Entscheider-Agenten

Analyse der simulierten Entscheidungssituation in Wärmeversorgungssystemen

Als zentrales Wärmeversorgungssystem für das Jahr 2020 wird der Erdgas-Brennwertkessel vor der Fernwärme gewählt, auch der Scheitholz- und der Heizöl-Brennwertkessel bekommen hohe Marktanteile, da diese auch mit geringen Investitionen verbunden sind.

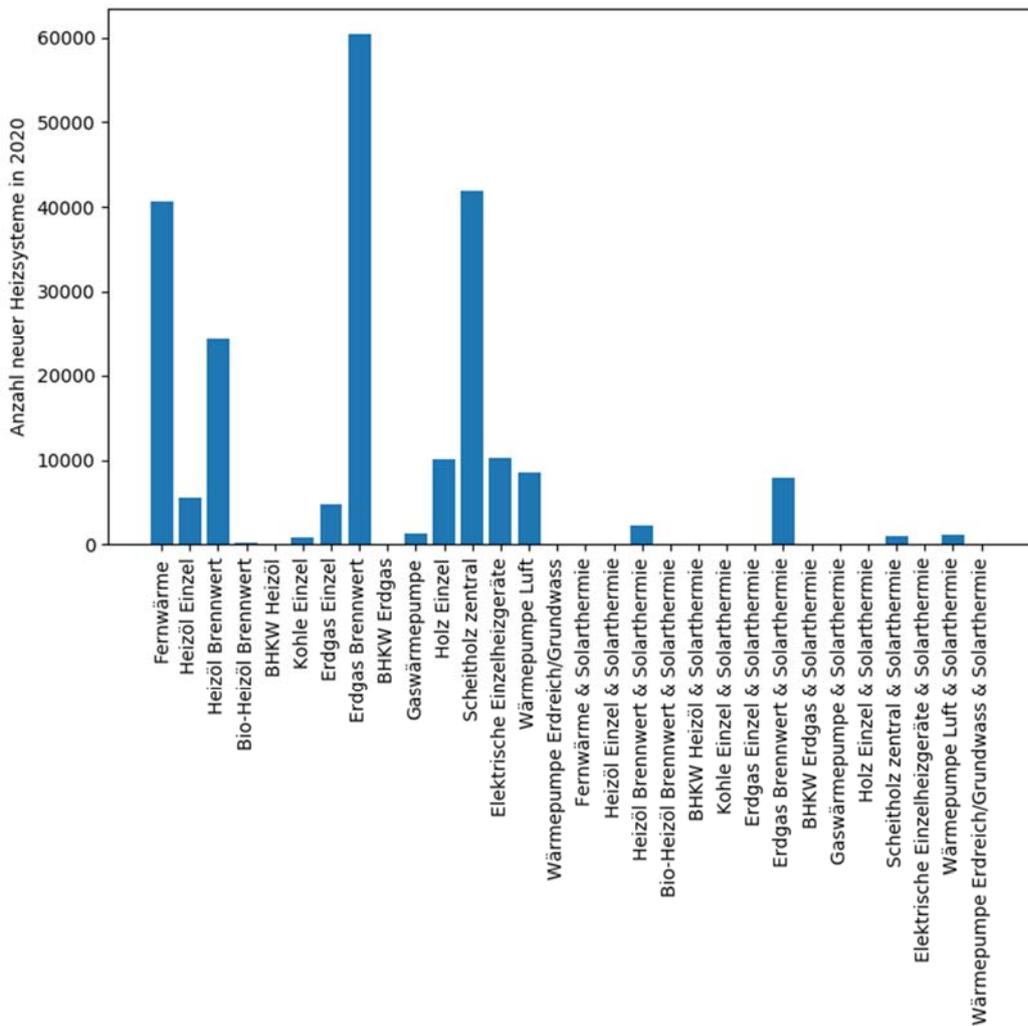


Abbildung 39: Anzahl neu installierter Heizsysteme des Instandsetzer-Entscheider-Agenten im Jahr 2020

Im Jahr 2050 gehen die Marktanteile noch stärker auf Fernwärme, da auch hier der hohe Gaspreis seine Wirkung zeigt. Auch die Luft/Wärmepumpe erhält Marktanteile, die aber im Vergleich zu den anderen Szenarien sehr gering ist.

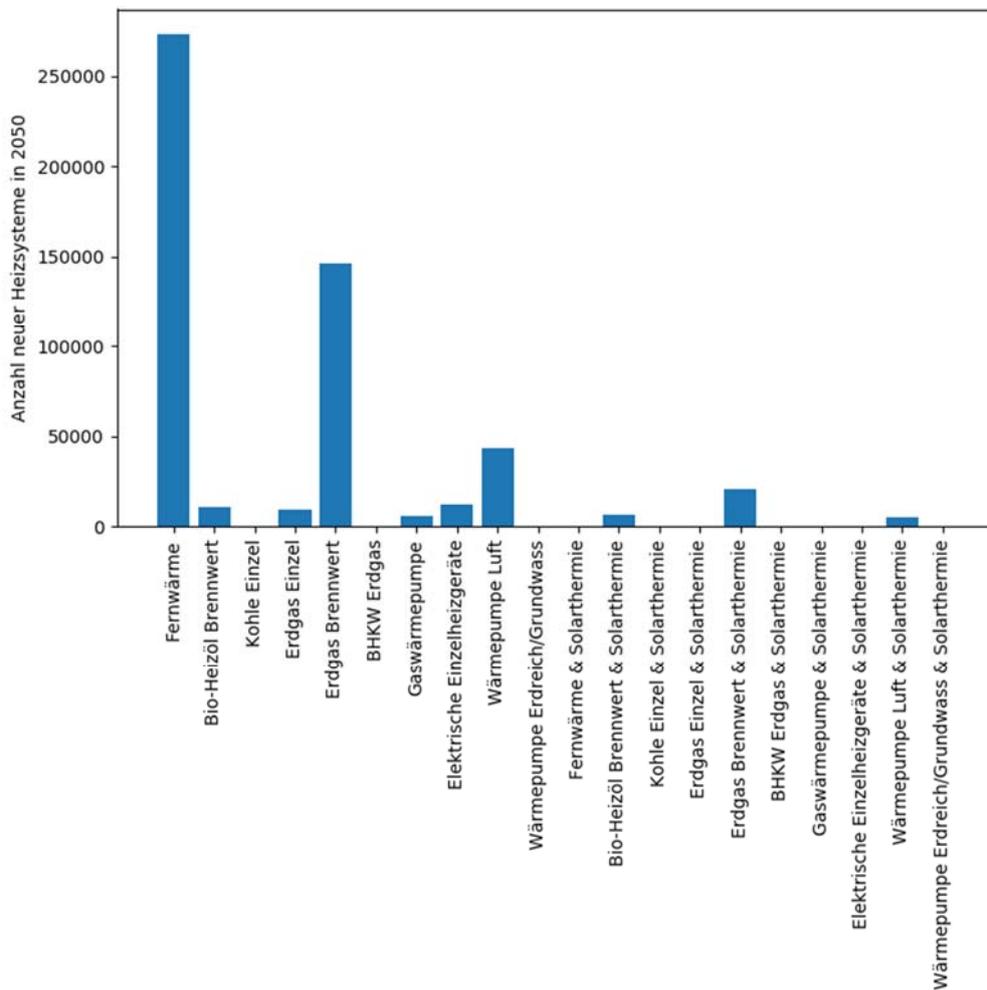


Abbildung 40: Anzahl neu installierter Heizsysteme des Instandsetzer-Entscheider-Agenten im Jahr 2050

4.7 Szenarien mit Marktrestriktionen

Der Vergleich der verschiedenen Entscheider-Agenten Szenarien hat gezeigt, dass sich sehr unterschiedliche Marktanteile ergeben können. Allerdings zeigen sich in der Realität durch gegebene Marktrestriktionen und Einflüsse stärkere Verharrungseffekte für bestimmte Technologien bzw. eine langsamere Marktdurchdringung neuer Technologien (vgl. 3.4) Die mit den Entscheider-Agenten aus dem Conjoint-Experiment parametrisierten Szenarien werden zusätzlich unter Berücksichtigung der Diffusionsrestriktionen gerechnet.

Abbildung 41 zeigt die Ergebnisse des Szenarios mit dem Cost-Sensitive-Entscheider-Agenten. Es wird deutlich, dass die Verharrungseffekte auf Erdgas sich bis 2050 hinziehen. Während im Cost-Sensitive-Szenario ohne Marktrestriktionen im Jahr 2050 nur noch 30 TWh Gas für die Wärmeversorgung in Gebäuden aufgewendet wird, liegt der Anteil in dem Szenario mit Marktrestriktionen doppelt so hoch. Der Anteil von Gaswärmepumpen als neue Technologie ist hingegen niedriger.

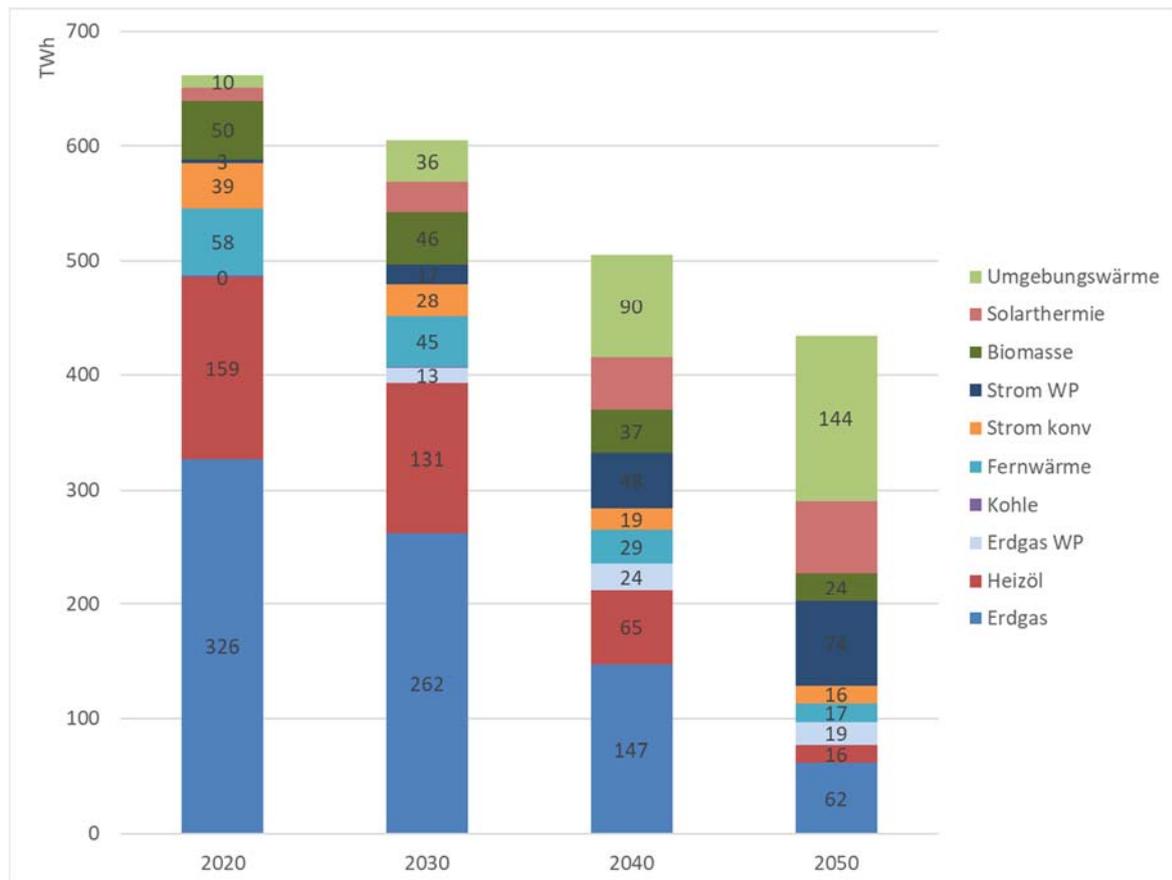


Abbildung 41: Entwicklung des Endenergieverbrauchs für Raumwärme und Warmwasser in Wohngebäuden und Nichtwohngebäuden (GHD) im Szenario Cost-Sensitive-Entscheider-Agent mit Marktrestriktionen

Ein ähnliches Bild zeigt sich für das Szenario mit Source-Sensitive-Entscheider-Agenten. Deren Ergebnisse haben in der Entwicklung bis 2050 auch ohne Marktrestriktionen die gleiche Tendenz aufgrund

der ähnlichen Parametrisierung hinsichtlich der Relevanz der Attribute bei den Wärmeversorgungssystemen. Durch die Marktrestriktionen wird dieser Angleich noch verstärkt.

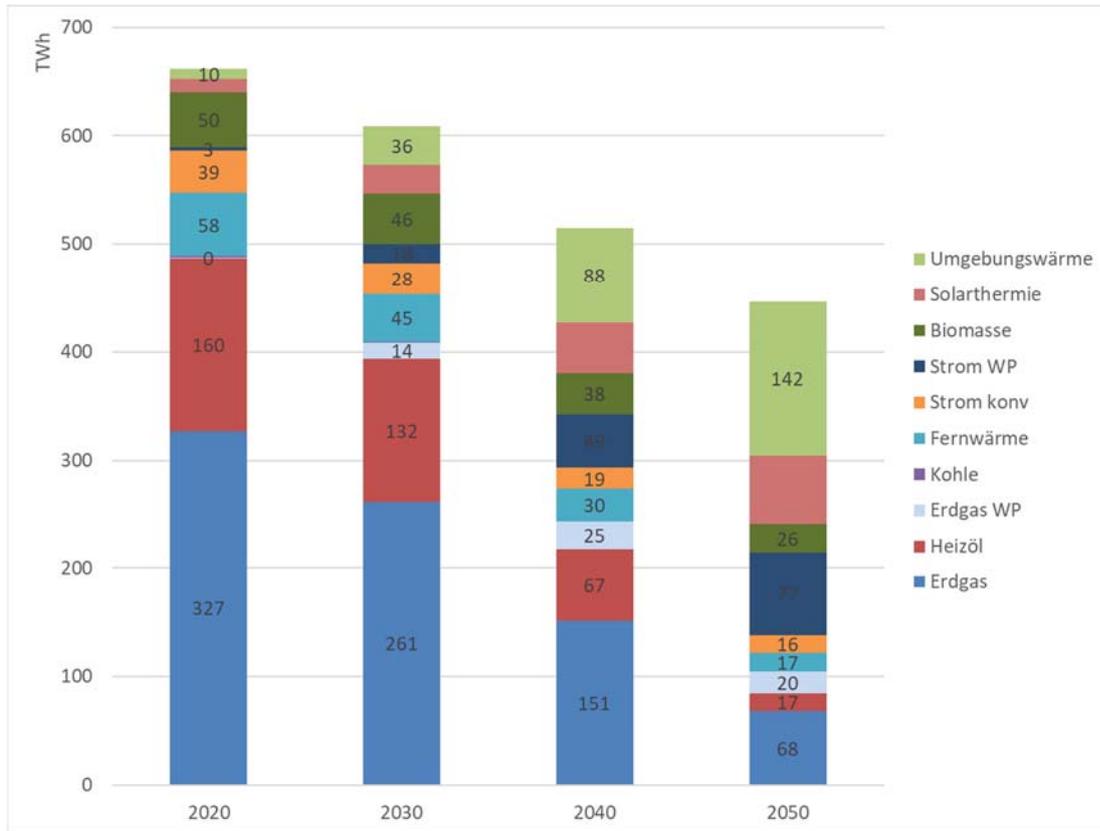


Abbildung 42: Entwicklung des Endenergieverbrauchs für Raumwärme und Warmwasser in Wohngebäuden und Nichtwohngebäuden (GHD) im Szenario Source-Sensitive-Entscheider-Agent mit Marktrestriktionen

5 Zusammenfassung

Durch den interdisziplinären Austausch zum Methoden- und Erhebungsdesign im Bereich für die empirische Forschung einerseits und der Operationalisierung und Methodenentwicklung der Energiesystemmodellierung andererseits, konnten wichtige Erkenntnisse mit Bezug auf die Abbildung grundlegenden Wirkungszusammenhänge und die konkrete Parametrisierung in der Modellierung umgesetzt werden. Als geeignete Methode zur Identifizierung und Quantifizierung von relevanten Parametern, die auch direkt in die Energiesystemmodellierung überführt werden können, hat sich das Conjoint-Experiment im Wohngebäudebereich als geeignet gezeigt. Die identifizierten Teilnutzenwerte in der Systemgrenze des Experimentes (Ausprägungsskalen) konnten über Skalierungsfunktionen ins Modell und damit in Gewichtungsfaktoren für generische Entscheidungsfunktionen überführt werden. Eine klare Segmentierung von Entscheider-Agenten, die sich mit Bezug auf den Sanierungsprozess und des Investitionsverhaltens anhand von soziodemografischen Parametern hochrechnen lassen, konnte nicht aus dem Experiment abgeleitet werden. Für das Szenariodesign in der Modellierung sind daher unterschiedliche Szenarien für die identifizierten Entscheider-Agenten implementiert und gerechnet worden. Um die Ergebnisse zu kontrastieren sind zusätzliche Szenarien mit generischen Entscheider-Typen erstellt worden. Mit Bezug auf die unterstellten Rahmendaten und Politikinstrumente führen die stark steigenden fossilen Brennstoffpreise zu einer Konvergenz der resultierenden Marktanteile trotz unterschiedlicher Relevanz der Attribute. Aus Sicht des Policy-Designs ist der CO₂-Preis somit eine zielführende Ergänzung zum bestehenden Instrumentarium, mit dem eine Steuerungswirkung für unterschiedliche Akteure erzielt werden kann.

Weitere Erkenntnisse mit Bezug auf die Einflüsse anderer Marktakteure sind in der Modellierung über ein Diffusionsmodell operationalisiert worden. Dies wird vor dem Hintergrund implementiert, dass die Erkenntnisse aus der empirischen Untersuchung die Relevanz beratender, planender und umsetzender Akteure identifiziert, die den Sanierungsprozess vor der eigentlichen Wahlentscheidung zwischen Alternativen stark beeinflussen. Eine detaillierte Parametrisierung konnte jedoch auf Basis der empirischen Daten noch nicht vorgenommen werden. Im Bereich der Nichtwohngebäude sind die Erkenntnisse zu Sanierungsanlässen mit Bezug auf eine energiekostenbedingte, gebäudealtersunabhängige Sanierungsrate im Modell implementiert worden. Allerdings hat sich auch hier gezeigt, dass viele wichtige Erkenntnisse nicht außerhalb der Systemgrenzen liegen (Geschäftsentwicklung) und nicht direkt modelliert werden können. Auch wenn die Ergebnisse der Akteursbefragung in Büro- und Handelsgebäuden wichtige Erkenntnisse liefert mit denen konzeptionelle Ansätze für die Modellierung entwickelt worden sind, konnten die Ergebnisse nicht direkt im Modell parametrisiert werden. Insgesamt bestehen im Nichtwohngebäudebereich große Datenlücken auch mit Bezug auf die Strukturdaten des Bestandes, so dass die Energiesystemmodellierung für diesen Bereich ohnehin mit hohen Unsicherheiten und Annahmen verbunden ist.

Vor dem Hintergrund, dass neben der Motivation der Gebäudeeigentümer und der Akzeptanz der Nutzer, insbesondere die Marktrestriktion für die Transformation des Gebäudesektors relevant ist, besteht weiterer Forschungsbedarf in dem Bereich der Marktakteure/Intermediäre. Im Rahmen dieses Projektes konnte sehr gut der Einfluss dieser Akteure auf die Investitionsentscheidung herausgearbeitet werden und im Modell operationalisiert werden. Allerdings ist noch völlig unklar welche Treiber es bedarf, dass Innovationen und für die Wärmewende notwendigen Technologien sich schneller am Markt etablieren und von diesen Akteuren zu den Entscheidern transportiert werden.

6 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Struktur des Simulationsmodells Invert/ee-lab.....	6
Abbildung 2: Wohnflächen nach Gebäudetyp und Baualtersklasse.....	8
Abbildung 3: Installierte Wärmeversorgungsstechnologien im Gebäudebestand in Deutschland.....	9
Abbildung 4: Eigentümerstruktur nach Gebäudetypen und Baualtersklasse der Gebäude.....	10
Abbildung 5: Spezifische Investitionen für Wärmeversorgungssysteme bis 50 kW.....	11
Abbildung 6: Spezifische Investitionen für Wärmeversorgungssysteme bis 50 kW.....	12
Abbildung 7: Spezifische Investitionen für Effizienzmaßnahmen differenziert nach Effizienzstandards und Referenzgebäude im Modell Invert/EE-Lab.....	14
Abbildung 8: Durchschnittliche Temperatur und Heiztage aus sechs Wetterstationen in Deutschland für das Jahr 2018.....	15
Abbildung 9: Vergleich Endenergieverbrauch Wärme Modellierung und Statistik.....	15
Abbildung 10: Arbeitsschritte und Überlappung bei der empirischen Modellbildung.....	16
Abbildung 11: Skalierungsfunktion für die Operationalisierung der Teilnutzenwerte für die Attribute Sanierungskosten und Energieeinsparung.....	21
Abbildung 12: Schematische Darstellung der Berechnung der Gewichtungsfaktoren.....	22
Abbildung 13: Relevanz der Attribute bei der Wärmeversorgungssystemwahl im Conjoint- Experiment.....	28
Abbildung 14: Relevanz der Attribute bei der Entscheidung in Energieeffizienzmaßnahmen im Conjoint-Experiment.....	29
Abbildung 15: Endverbraucherpreise Haushalte Biomasse und Biogas (inkl. MwSt.).....	30
Abbildung 16: Endverbraucherpreise Haushalte Strom (inkl. MwSt.).....	31
Abbildung 17: Endverbraucherpreise Haushalte fossile Brennstoffe und Fernwärme.....	31
Abbildung 18: Annahme zur Entwicklung der CO ₂ -Preise für Verkehr und Wärme im BEHG.....	34
Abbildung 19: Entwicklung des Endenergieverbrauchs für Raumwärme und Warmwasser in Wohngebäuden und Nichtwohngebäuden (GHD) im Szenario Cost-Sensitive ohne Marktrestriktionen.....	35
Abbildung 20: Nutzwerte der Sanierungsoptionen des Cost-Sensitive Entscheider-Agenten nach Gebäudeklassen im ersten Simulationsjahr.....	36
Abbildung 21: Simulierte Marktanteile der im Modell abgebildeten Sanierungspakete im ersten Simulationsjahr des Cost-Sensitive Entscheider-Agent.....	37
Abbildung 22: Anzahl neu installierter Heizsysteme des Cost-Sensitive-Entscheider-Agenten im Jahr 2020.....	38
Abbildung 23: Anzahl neu installierter Heizsysteme des Cost-Sensitive-Entscheider-Agenten im Jahr 2030.....	39
Abbildung 24: Anzahl neu installierter Heizsysteme des Cost-Sensitive-Entscheider-Agenten im Jahr 2050.....	40
Abbildung 25: Entwicklung des Endenergieverbrauchs für Raumwärme und Warmwasser in Wohngebäuden und Nichtwohngebäuden (GHD) im Szenario Source-Sensitive ohne Marktrestriktionen.....	41
Abbildung 26: Nutzwerte der Sanierungsoptionen des Source-Sensitive Entscheider-Agenten nach Gebäudeklassen im ersten Simulationsjahr.....	42

Abbildung 27: Simulierte Marktanteile der im Modell abgebildeten Sanierungspakete im ersten Simulationsjahr des Cost-Sensitive Entscheider-Agent.....	43
Abbildung 28: Anzahl neu installierter Heizsysteme des Source-Sensitive-Entscheider-Agenten im Jahr 2020.....	44
Abbildung 29: Anzahl neu installierter Heizsysteme des Source-Sensitive-Entscheider-Agenten im Jahr 2030.....	45
Abbildung 30: Anzahl neu installierter Heizsysteme des Source-Sensitive-Entscheider-Agenten im Jahr 2050.....	46
Abbildung 31: Entwicklung des Endenergieverbrauchs für Raumwärme und Warmwasser in Wohngebäuden und Nichtwohngebäuden (GHD) im Szenario Rationaler-Entscheider-Agent ohne Marktrestriktionen.....	47
Abbildung 32: Nutzwerte der Sanierungsoptionen des Rational-Entscheider-Agenten nach Gebäudeklassen im ersten Simulationsjahr.....	48
Abbildung 33: Simulierte Marktanteile der im Modell abgebildeten Sanierungspakete im ersten Simulationsjahr des Rationaler-Entscheider-Agent	48
Abbildung 34: Anzahl neu installierter Heizsysteme des Rationalen-Entscheider-Agenten im Jahr 2020.....	49
Abbildung 35: Anzahl neu installierter Heizsysteme des Rationalen-Entscheider-Agenten im Jahr 2050.....	50
Abbildung 36: Entwicklung des Endenergieverbrauchs für Raumwärme und Warmwasser in Wohngebäuden und Nichtwohngebäuden (GHD) im Szenario Instandsetzer-Entscheider-Agent ohne Marktrestriktionen	51
Abbildung 37	52
Abbildung 38: Simulierte Marktanteile der im Modell abgebildeten Sanierungspakete im ersten Simulationsjahr des Instandsetzer-Entscheider-Agenten.....	52
Abbildung 39: Anzahl neu installierter Heizsysteme des Instandsetzer-Entscheider-Agenten im Jahr 2020.....	53
Abbildung 40: Anzahl neu installierter Heizsysteme des Instandsetzer-Entscheider-Agenten im Jahr 2050.....	54
Abbildung 41: Entwicklung des Endenergieverbrauchs für Raumwärme und Warmwasser in Wohngebäuden und Nichtwohngebäuden (GHD) im Szenario Cost-Sensitive-Entscheider-Agent mit Marktrestriktionen	55
Abbildung 42: Entwicklung des Endenergieverbrauchs für Raumwärme und Warmwasser in Wohngebäuden und Nichtwohngebäuden (GHD) im Szenario Source-Sensitive-Entscheider-Agent mit Marktrestriktionen	56
Abbildung 43: Nutzwerte der Sanierungsoptionen des Nichtwohngebäude Entscheider-Agenten nach Gebäudeklassen im ersten Simulationsjahr.....	63
Abbildung 44: Simulierte Marktanteile der im Modell abgebildeten Sanierungspakete im ersten Simulationsjahr des Nichtwohngebäude Entscheider-Agenten	63

7 Tabellenverzeichnis

Tabelle 1 Anteile der Eigentümerklassen an den Gebäudekategorien im Wohngebäudebereich.....	10
Tabelle 2: Jahresnutzungsgrad der Wärmeversorgungstechnologien	12
Tabelle 3: Definition der Entscheider Agenten – Variablen für jeden Agenten	18
Tabelle 4: Operationalisierungsvariablen für die Wahrnehmung der Attributsausprägung.....	22
Tabelle 5: Spezifische Fördersätze Wärmeversorgungssysteme entsprechend der geltenden Förderrichtlinie.....	32
Tabelle 6: Spezifische Fördersätze für energetische Sanierungsmaßnahmen	32

8 Literaturverzeichnis

- AGEB. (2020). Auswertungstabellen zur Energiebilanz Deutschland - Daten für die Jahre 1990 bis 2019. <https://ag-energiebilanzen.de/10-0-Auswertungstabellen.html>
- Bass, F. M. (1967). A new product growth for model consumer durables. *Management Science*, 15(August), p215–227. <https://doi.org/10.1287/mnsc.15.5.215>
- Bundesregierung. (2020). CO2-Bepreisung.
- Cischinsky, H., & Diefenbach, N. (2018). Datenerhebung Wohngebäudebestand 2016 - Datenerhebung zu den energetischen Merkmalen und Modernisierungsraten im deutschen und hessischen Wohngebäudebestand (1. Auflage). Institut Wohnen und Umwelt (IWU).
- Cischinsky, H., Diefenbach, N., & Rodenfels, M. (2018). Datenerhebung Wohngebäudebestand 2016. Anleitung zur Durchführung von Auswertungen mit der Auswertungsdatenbank (Bd. 49, Nummer 0).
- Diefenbach, N., Cischinsky, H., Rodenfels, M., & Clausnitzer, K.-D. (2010). Datenbasis Gebäudebestand - Datenerhebung zur energetischen Qualität und zu den Modernisierungstrends im deutschen Wohngebäudebestand (Nummer 0049). Institut Wohnen und Umwelt (IWU).
- Dirich, S., Gruhler, K., Deilman, C., Petereit, R., Petereit, K., Kunz, C., Hemple, A., & Markfort, D. (2011). Typologie und Bestand beheizter Nichtwohngebäude in Deutschland (BMVBS-Online-Publikation 16/2011, Nummer 16).
- Fichtner, Fraunhofer ISE, TFZ, Qconcept Energy, DBI-Gas- und Umwelttechnik GmbH, & IE Leipzig. (2019). Evaluation des Marktanzreizprogramms zur Förderung von Maßnahmen zur Nutzung erneuerbarer Energien im Wärmemarkt im Förderzeitraum 2015 bis 2018 (Nummer November). https://www.erneuerbare-energien.de/EE/Redaktion/DE/Downloads/Berichte/evaluierung-marktanreizprogramm-2018.pdf?jsessionid=FF3F64E352F057C66B1E0733AEE2A5B3?__blob=publicationFile&v=2#page=1&zoom=auto,-158,848
- Goldstein, D. G., & Gigerenzer, G. (1999). The recognition heuristic: How ignorance makes us smart (S. 37–58). Oxford University Press. <http://psycnet.apa.org/psycinfo/1999-04366-002>
- Henkel, J. (2011). Modelling the diffusion of innovative heating systems in Germany—Decision criteria, influence of policy instruments and vintage path dependencies. April. http://opus4.kobv.de/opus4-tuberlin/files/3305/henkel_johannes.pdf
- Hinz, E. (2011). Untersuchung zur weiteren Verschärfung der energetischen Anforderungen an Wohngebäude mit der EnEV 2012 - Kosten energierelevanter Bau- und Anlagenteile bei der energetischen Modernisierung von Altbauten (Nummer Xx). Institut für Wohnen und Umwelt (IWU) im Auftrag des Bundesinstituts für Bau-, Stadt- und Raumforschung (BBSR).
- Hörner, M., Schwarz, S., & Busch, R. (2018). ENOB: dataNWG Forschungsdatenbank Nichtwohngebäude - Kurzbericht nach der Pilotphase.
- IWU. (2020). Gradtageszahlen in Deutschland - Excel-Berechnungstool zur Bestimmung der tatsächlichen Heizgradtage. <https://www.iwu.de/publikationen/tools/>
- Jager, W. (2000). Modelling consumer behaviour [Rijksuniversiteit Groningen]. <http://www.narcis.nl/publication/RecordID/oai:ub.rug.nl:dbi%2F43565ccdc562c>
- Kranzl, L., Hummel, M., Müller, A., & Steinbach, J. (2013). Renewable heating: perspectives and the impact of policy instruments. *Energy Policy*, 59, 44–58. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2013.03.050>

- Lawless, J. F. (2003). *Statistical models and methods for lifetime data*. Wiley-Interscience.
<http://www.amazon.de/Statistical-Models-Methods-Lifetime-Data/dp/0471372153>
- Maas, A., & Schlitzberger, S. (2017). *EnEV 2017 – Vorbereitende Untersuchungen (BBSR (Hrsg.))*. Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung (BBSR) im Bundesamt für Bauwesen und Raumordnung (BBR) (Hrsg.).
https://www.bbsr.bund.de/BBSR/DE/Veroeffentlichungen/BBSROnline/2017/bbsr-online-16-2017-dl.pdf?__blob=publicationFile&v=2 %0A
- Marschak, J. (1960). Binary Choice Constraints on Random Utility Indicators. In J. A. Kenneth, S. Karlin, & P. Suppes (Hrsg.), *Mathematical Methods in the social science 1959: Proceedings of the first Stanford Symposium*. Stanford University Press. <http://ideas.repec.org/p/cwl/cwldpp/74.html>
- Müller, A. (2015). *Energy Demand Assessment for Space Conditioning and Domestic Hot Water: A Case Study for the Austrian Building Stock*. Technische Universität Wien.
- Öko-Institut et al. (2020). *Rahmendatenbericht für Politikszenerarien IX* (unveröffentlicht).
- Schlomann, B., Steinbach, J., Kleeberger, H., Geiger, B., Pich, A., Gruber, E., Mai, M., Gerspacher, A., & Schiller, W. (2013). *Energieverbrauch des Sektors Gewerbe, Handel, Dienstleistungen (GHD) in Deutschland für die Jahre 2007 bis 2010*. Fraunhofer-Verl. http://www.isi.fraunhofer.de/isi-wAssets/docs/e/de/publikationen/GHD-Erhebung_Bericht_Energieverbrauch_2006-2010.pdf
- StaBuA. (2019). *Bautätigkeit und Wohnungen - Bestand an Wohnungen Fachserie 5 Reihe 3*.
- StaBuA. (2020). *Preisindizes für Bauwerke, Wohngebäude und Nichtwohngebäude*.
<https://www.destatis.de/DE/Themen/Wirtschaft/Konjunkturindikatoren/Preise/bpr110.html>
- Statische Ämter des Bundes und der Länder. (2019). *Wohnen in Deutschland - Zusatzprogramm des Mikrozensus 2018*.
- Statistische Ämter des Bundes und der Länder. (2015). *Zensus 2011 Gebäude- und Wohnungsbestand in Deutschland - endgültige Ergebnisse*. www.statistikportal.de. %0AErschienen
- Steinbach, J. (2015). *Modellbasierte Untersuchung von Politikinstrumenten zur Förderung erneuerbarer Energien und Energieeffizienz im Gebäudebereich* (Fraunhofer ISI (Hrsg.)). Fraunhofer Verlag.
<https://www.verlag.fraunhofer.de/bookshop/buch/Modellbasierte-Untersuchung-von-Politikinstrumenten-zur-Foerderung-erneuerbarer-Energien-und-Energieeffizienz-im-Gebaeuebereich/245046>
- Steinbach, J., & Schultmann, F. (2015). *Sanierung des deutschen Gebäudebestandes auf unterschiedliche Effizienzstandards – gesamtwirtschaftliche Investitionen und Energieeinsparungen*. IEWT 2015, 9. Internationale Energiewirtschaftstagung an der TU Wien, 1–17.
- Steinbach, J., Staniaszek, D., Anagnostopoulos, F., Lottes, R., Kranzl, L., & Toleikyte, A. (2016). *Die Sanierung des deutschen Gebäudebestandes - eine wirtschaftliche Bewertung aus Investorensicht*. In *Energieeffizienz in Gebäuden - Jahrbuch 2016* (S. 77–86). VME - Verlag und Medienservice Energie Jürgen Pöschk.
- Train, K. E. (2002). *Discrete Choice Methods with Simulation*. Cambridge University Press.
http://books.google.com/books?id=F_gYALlfR4C
- Train, K. E. (2003). *Discrete Choice Methods with Simulation*. Cambridge University Press.
http://books.google.com/books?id=F_gYALlfR4C
- VDI 2067-1. (2012). *VDI Richtlinie: Wirtschaftlichkeit gebäudetechnischer Anlagen - Grundlagen und Kostenberechnung*. Beuth Verlag. <http://www-fr.redi-bw.de/db/perinorm/>

9 Anhang

9.1 Nichtwohngebäude Effizienzmaßnahmen Entscheidung

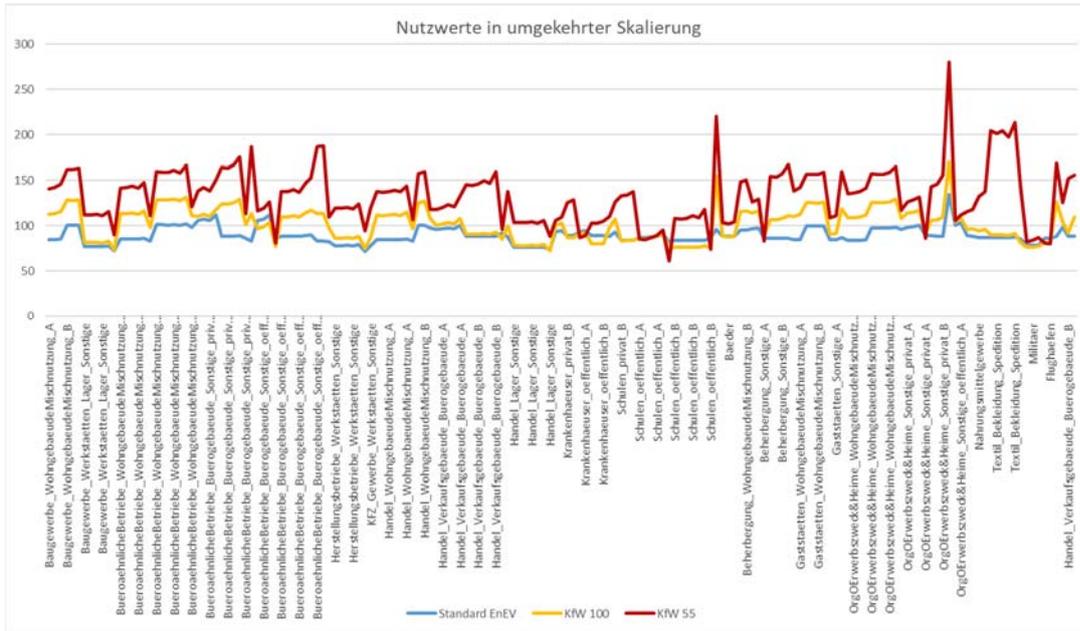


Abbildung 43: Nutzwerte der Sanierungsoptionen des Nichtwohngebäude Entscheider-Agenten nach Gebäudeklassen im ersten Simulationsjahr

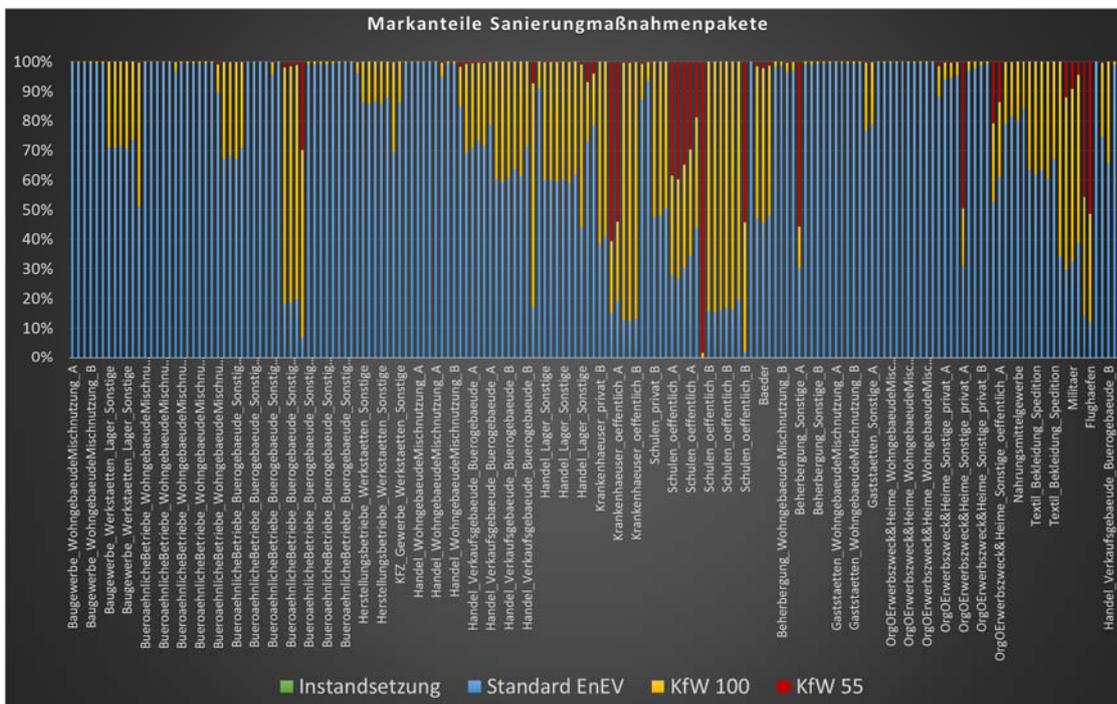


Abbildung 44: Simulierte Marktanteile der im Modell abgebildeten Sanierungs Pakete im ersten Simulationsjahr des Nichtwohngebäude Entscheider-Agenten