



Endbericht

Projekt MANIFOLD

Gemeinsamer Endbericht des Projektes „MANIFOLD: Modellentwicklung und Modellkopplung zu Akteursverhalten in Innovations- und Diffusionsnetzwerken“ (FKZ: 03EI1006A-G)

Laufzeit: 1.10.2019 - 31.10.2023

Ort: Karlsruhe
Datum: Dezember 2023

Gefördert durch:



aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

Impressum

MANIFOLD - Endbericht

Projektleitung

Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung ISI

Breslauer Straße 48, 76139 Karlsruhe
Heike Brugger, heike.brugger@isi.fraunhofer.de

Zuwendungsempfänger

Fraunhofer Gesellschaft für Angewandte Forschung e.V.

Ausführende Stellen:
Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung ISI (FKZ: 03EI1006A)
Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme ISE (FKZ: 03EI1006E)

IQIB - Institut für qualifizierende Innovationsforschung und -beratung GmbH (FKZ: 03EI1006B)

Universität Stuttgart (FKZ: 03EI1006C)

IREES GmbH - Institut für Ressourceneffizienz und Energiestrategien (FKZ: 03EI1006D)

Rheinisch Westfälische Technische Hochschule Aachen (FKZ: 03EI1006F)

Technische Universität Carolo-Wilhelmina zu Braunschweig (FKZ: 03EI1006G)

Fördermittelgeber

Projektträger Jülich für das Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK)

Autor:innen

Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autor:innen.

Heike Brugger, heike.brugger@isi.fraunhofer.de; Alexandra Pröpper, alexandra.proepper@isi.fraunhofer.de;
Christiane Bernath, christiane.bernath@isi.fraunhofer.de

Fraunhofer Institut für System- und Innovationsforschung (ISI), Karlsruhe

Bert Droste-Franke, bert.droste-franke@iqib.de; Markus Voge, markus.voge@iqib.de; Davy van Doren,
davy.vandoren@iqib.de

Institut für qualifizierende Innovationsforschung und -beratung (IQIB), Bad Neuenahr-Ahrweiler

Audrey Dobbins, audrey.dobbins@ier.uni-stuttgart.de; Ulrich Fahl, ulrich.fahl@ier.uni-stuttgart.de; Kerstin
Haller, kerstin.haller@ier.uni-stuttgart.de

Institut für Energiewirtschaft und Rationelle Energieanwendung (IER), Universität Stuttgart

Sandra Wassermann

Zentrum für Interdisziplinäre Risiko- und Innovationsforschung (ZIRIUS), Universität Stuttgart

Jan Steinbach, j.steinbach@irees.de

Institut für Ressourceneffizienz und Energiestrategien (IREES), Karlsruhe

Charlotte Senkpiel, charlotte.senkpiel@ise.fraunhofer.de; Connor Thelen, connor.thelen@ise.fraunhofer.de;
Hannah Nolte, hannah.nolte@ise.fraunhofer.de; Christoph Kost, christoph.kost@ise.fraunhofer.de

Fraunhofer Institut für Solare Energiesysteme (ISE), Freiburg

Christina Kockel, christina.kockel@eonerc.rwth-aachen.de; Jakob Kulawik, jakob.kulawik@eonerc.rwth-aachen.de

Lehrstuhl für Energiesystemökonomik, Institute for Future Energy Consumer Needs and Behavior (FCN-ESE), RWTH Aachen University

Farina Wille, farina.wille@tu-braunschweig.de

Technische Universität Braunschweig, Institut für Psychologie, Abteilung für Psychologische Methodenlehre und Biopsychologie (IPMB)

Veröffentlicht

Dezember 2023

Hinweise

© Fraunhofer ISI, IQIB GmbH, IER Universität Stuttgart, ZIRIUS Universität Stuttgart, IREES GmbH, Fraunhofer ISE, FCN RWTH Aachen University, IPMB TU Braunschweig (2023) Manifold - Endbericht (03EI1006). Karlsruhe

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 Auftraggebers wider.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung und Struktur	7
2	Kurzdarstellung der Aufgabenstellung des Projektes	8
2.1	Problemstellung	8
2.2	Zielsetzung	8
3	Wissensstand und Forschungslücke	12
3.1	Wissensstand bezüglich der Berücksichtigung von individuellem Verhalten und Einstellungen in techno-ökonomischen Modellen	12
3.2	Empirische sozialwissenschaftliche Ergebnisse als Modellinput für Energiesystemmodelle	12
4	Entwicklung der Schnittstellen zwischen den Modellen und zur Empirie....	15
4.1	Modellkopplung	15
4.2	Modellentwicklungen und -erweiterungen entsprechend der definierten Schnittstellen 17	
4.2.1	Erweiterung Technologiegenesemodell	17
4.2.2	Erweiterung der Diffusionsmodelle	18
4.3	Sozialwissenschaftliche Empirie und Schnittstellen zu den Modellen - Qualitative Interviews und Discrete Choice Experimente.....	19
4.4	Schnittstelle zwischen den Energiesystemmodellen und Invert zu SLICK.....	20
4.5	Modellierung sozio-politischer Akzeptanz.....	21
5	Ergebnisse der empirischen, sozialwissenschaftlichen Analysen	22
5.1	Empirischer Input Technologiegenesemodell	22
5.2	Ermittlung der Investitionsbereitschaft für die Diffusionsmodelle	22
5.3	Empirischer Input für das Modell sozio-politischer Akzeptanz.....	24
6	Interdisziplinäre Entwicklung und Evaluation von Politikinstrumenten	26
6.1	Szenariendefinition	26
7	Ergebnisse der Modellierung	29
7.1	Technologiegenese- und Lernkurvenmodellierung	29
7.2	Diffusionsmodelle	32
7.3	Modellierung sozio-politische Akzeptanz	39
8	Einbindung von empirischem Input in techno-ökonomische Energiesystemmodelle.....	43
8.1	Integration sozialwissenschaftlicher Faktoren in Energiesystemmodellen	43
8.2	Verbesserte Abbildung von Akteuren in Innovationsnetzwerken in bestehenden Energiesystemmodellen.....	44

9	Verbesserte Abbildung von Akteuren in Diffusionsnetzwerken in bestehenden Energiesystemmodellen	46
10	Fazit	48
11	Veröffentlichung der Ergebnisse	51
12	Abbildungsverzeichnis.....	53
13	Tabellenverzeichnis	54
14	Literaturverzeichnis	55
A.1	Übersicht über die Dokumentanhänge.....	56
A.1.1	Ergänzung zum Meilenstein-Dokument 3: Veröffentlichter Journal Article: "Simulation von Innovationsdynamiken im Kontext der Energiewende" (Globisch et al., 2019)	I
A.1.2	Meilenstein-Dokument 1-3: Veröffentlichter Journal Article: „Integrating Methods and Empirical Findings from Social and Behavioural Sciences into Energy System Models - Motivation and Possible Approaches" (Senkpiel et al., 2020)	II
A.1.3	Meilenstein-Dokument 4: „Definition von Anforderungen an empirischen Input für die Akteursmodelle (Empirie → Akteursmodelle) und Konkretisierung der Schnittstellen zwischen Akteursmodellen und Remod, TIMES, Enertile und Invert/EE-Lab"	III
A.1.4	Meilenstein-Dokument 5: Dokument zum empirischen Input in Akteurs-modelle und techno-ökonomische Modelle inkl. Diskussion der technologie-generischen Übertragbarkeit der Erhebungsmethoden	IV
A.1.5	Meilenstein-Dokument 6: Dokument zu Vor- und Nachteilen unterschiedlicher Arten der Einbindung von empirischem Input in techno-ökonomische Modelle	V
A.1.6	Meilenstein-Dokument 7: Dokument zum methodischen Potential der Projektergebnisse für die Modellierung von Technikakzeptanz, Hemmnisanalysen sowie der Simulation und Analyse regulatorischer Rahmenbedingungen	VI

Abkürzungsverzeichnis

Abkürzung	
ABM	Agentenbasiertes Modell
CGE	Gleichgewichtsmodelle
DCE	Discrete Choice-Experimente
ESM	Energiesystemmodelle
ESOM	Energieoptimierungsmodelle
GHD	Gewerbe, Handel, Dienstleistungen
LCA	Latent Class Analysis
PANDORA	Policy Acceptance, Diffusion of Opinions and Relations among Actors
SET	Strategieplan für Energietechnologie
SKIN	Simulating Knowledge Dynamics in Innovation Networks
SLICK	Simulating Learning Curves via Knowledge modeling
TAM	TIMES-Akteursmodell
TAM-HHs	TIMES Akteurs-Modell-Households
THG-Emissionen	Treibhausgasemissionen
WTP	Willingness-to-pay (Zahlungsbereitschaft)

1 Einleitung und Struktur

Der vorliegende Endbericht fasst die Forschungsergebnisse des Projekts „MANIFOLD: Modellentwicklung und Modellkopplung zu Akteursverhalten in Innovations- und Diffusionsnetzwerken“ zusammen, das im Rahmen des Energieforschungsprogramms „Innovationen für die Energiewende“ des Bundesministeriums für Wirtschaft und Klimaschutz gefördert wurde.

Nachhaltige Energieinnovationen sind für den Klimaschutz unverzichtbar und erfordern ein besseres Verständnis ihrer Akzeptanz und Verbreitung. Die Berücksichtigung sozialer Aspekte ist für die Entwicklung einer effektiven Klimapolitik unerlässlich. Dies gilt insbesondere für die Wärmewende, die ein hohes Maß an gesamtgesellschaftlicher Partizipation erfordert. Ziel des Projektes war es, traditionell technisch-ökonomisch orientierte Modelle um sozialwissenschaftliche Erkenntnisse zu erweitern. Durch die Einbeziehung von Ergebnissen aus empirischen Studien und die Integration verschiedener Modelle sollten Akzeptanz und Hemmnisse besser erfasst und die Auswirkungen politischer Maßnahmen besser analysiert werden.

Der vorliegende Bericht fasst die wichtigsten Arbeitsschritte, Erkenntnisse und Ergebnisse des Projektes zusammen. Der Bericht ist wie folgt aufgebaut: Er beginnt mit einer kurzen Darstellung der Problemstellung, der Zielsetzung sowie der Durchführung in Kapitel 2. In Kapitel 3 werden der Stand des Wissens sowie die Forschungslücke dargestellt. Kapitel 4 widmet sich der konzeptionellen Entwicklung der Schnittstellen zwischen den verschiedenen Modellen sowie zwischen den Modellen und der Empirie. Anschließend werden in Kapitel 5 die Ergebnisse der empirischen sozialwissenschaftlichen Analysen dargestellt. Kapitel 6 umfasst die interdisziplinäre Entwicklung und Bewertung von Politikinstrumenten entlang mehrerer Szenarien. Kapitel 8 fasst schließlich zusammen, wie die empirischen Ergebnisse in die techno-ökonomischen Energiesystemmodelle einfließen. Der vorliegende Bericht wird ergänzt durch die ausführlichen Darstellungen in den Meilenstein-Dokumenten, die im Anhang dieses Berichts zu finden sind.

2 Kurzdarstellung der Aufgabenstellung des Projektes

2.1 Problemstellung

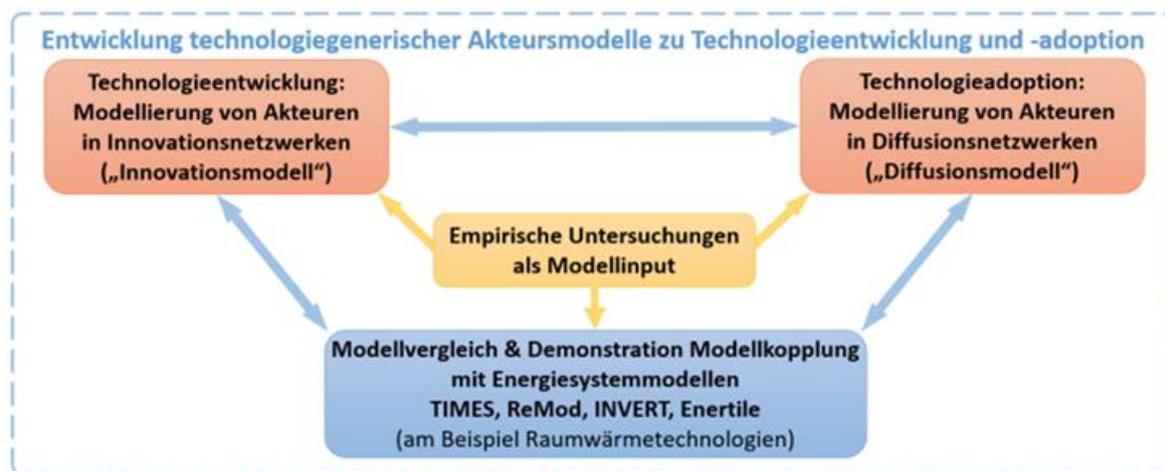
Die Entwicklung neuer nachhaltiger Energietechnologien und deren breite Diffusion sind von zentraler Bedeutung, um die zur Eindämmung des Klimawandels notwendige Reduktion der Treibhausgasemissionen (THG-Emissionen) zu erreichen. Um die Mechanismen, die der Entwicklung und Diffusion von Innovationen zugrunde liegen, adäquat in Modellen abbilden und damit effektivere Politikinstrumente entwickeln zu können, ist die sozialwissenschaftlich-psychologische Betrachtung von Akteur:innen, Akteursgruppen und -interaktionen und damit auch der Akzeptanz von Akteur:innen von zentraler Bedeutung. Da sich die Abbildung empirischer Analysen zum Akteursverhalten in (techno-ökonomischen) Energiesystemmodellen in der Praxis häufig als schwierig erweist, stellt die Entwicklung eigenständiger Akteursmodelle, in denen eine Fokussierung auf sozialwissenschaftlich-psychologische Aspekte möglich ist, einen wichtigen Entwicklungsschritt in der Forschung dar. Allgemeine Energiesystemmodelle weisen aufgrund ihrer Fokussierung auf makroskopische Phänomene oder aufgrund ihrer Modellgröße häufig eine Struktur auf, die die Abbildung kleinteiliger, mikroskopischer Akteursstrukturen (z.B. Branchen als kleinste Analyseeinheiten) nicht vorsieht. Bei techno-ökonomischen Modellen, die auf einen bestimmten Ausschnitt des Energiesystems ausgerichtet sind (z.B. die thermische Konditionierung von Gebäuden), ist die Abbildung solcher Akteursstrukturen dagegen prinzipiell möglich. Allerdings weisen diese Modelle häufig bereits einen sehr hohen Detaillierungsgrad hinsichtlich der betrachteten Technologien auf. Daher stößt die zusätzliche Berücksichtigung verschiedener Akteursgruppen und -untergruppen und deren Interaktion untereinander hier an praktische Grenzen hinsichtlich der vertretbaren Modellkomplexität und der daraus resultierenden Rechenzeit.

Die Untersuchung der Möglichkeiten zur Integration empirischer Daten war ein wesentliches Ziel des Projektes. Im Projektverlauf wurde die Option der Entwicklung eines Akteursmodells erwogen, das eine Scharnierfunktion zwischen sozialwissenschaftlicher Empirie und technisch-ökonomischen Modellen und einer damit verbundenen Standardisierung von Schnittstellen hätte einnehmen können. Es hat sich jedoch gezeigt, dass die (techno-ökonomische) Modelllandschaft zu heterogen ist, um universelle Schnittstellen zu definieren, vielmehr sind diese abhängig von den jeweiligen Modellen. So kann beispielsweise das Akteursmodell PANDORA den politischen Szenarienrahmen überprüfen. Die Schnittstelle für das Innovationsmodell SKIN liegen eher bei einzelnen Faktoren wie der Wissensverbreitung zur Aufnahme in bestimmte Modelle (wie InvertEE/Lab). Die methodische Herausforderung des Projektes bestand daher in der Integration empirischen Inputs über eine komplexe Modellkopplung.

2.2 Zielsetzung

Zielsetzung von MANIFOLD war es Energiesystemmodelle trotz ihres primär techno-ökonomischen Fokus dazu zu befähigen, die Ergebnisse aus quantitativen und qualitativen empirischen sozialwissenschaftlichen Analysen (z.B. Fragebogenstudien, Conjoint-Analysen, Leitfadeninterviews, etc.) zum Verhalten von Akteur:innen (z.B. Bürger:innen, Unternehmen, Nichtregierungsorganisationen, etc.) besser und v.a. mit geringerem methodischen Aufwand zu berücksichtigen. Hinsichtlich der Systemanalyse sollten dadurch insbesondere Fortschritte im Bereich modelltechnischer Fragen der Technikakzeptanz und Hemmnisanalyse erzielt und eine realistischere Simulation und Analyse regulatorischer Rahmenbedingungen ermöglicht werden. Eine Übersicht zum Projektkonzept gibt Abbildung 1.

Abbildung 1: Entwicklung technologiegenerischer Akteursmodelle zu Technologieentwicklung und -adoption



Um diese Ziele zu erreichen, wurden in diesem Projekt zwei Akteursmodelle (weiter-)entwickelt:

(1) Neuentwicklung: Modellkomponente SLICK (*Simulating Learning Curves via Knowledge modeling* - Erweiterung des SKIN-Energy-Modells) fokussiert auf die Analyse des Verhaltens von Akteur:innen in Innovationsnetzwerken, d.h. auf Akteur:innen, die an der Erforschung, Entwicklung und Erzeugung neuer Technologien beteiligt sind. Dazu gehören vor allem Unternehmen und Forschungsinstitute, die neues Wissen generieren und über Kooperationen austauschen, um neue Produkte zu entwickeln ("Innovationsmodell"). Dabei deckt SLICK insbesondere den Einfluss von politischen Maßnahmen auf das Wissen und die Präferenzen bzw. Möglichkeiten von Wärmeanlagen-Installateur:innen ab. Durch die Modellierungen entsteht ein neuer Anknüpfungspunkt zwischen der Technologiegenese und der Technologiediffusion.

(2) Neuentwicklung: Das Modell PANDORA ermöglicht Aussagen darüber, wie realistisch verschiedene zukünftige politisch-gesellschaftliche Rahmenbedingungen sind bzw. wie solche Rahmenbedingungen am ehesten erreicht werden können. Solche Informationen stellen einen methodischen und praktischen Mehrwert für techno-ökonomische Analysen dar und können über eine qualitative Schnittstelle erzielt werden.

(3) Weiterentwicklung Diffusionsmodelle: Diffusionsmodelle sind auf die Analyse des Verhaltens von Akteur:innen in Diffusionsnetzwerken ausgerichtet, d.h. auf Akteur:innen, die die Verbreitung von neuen Technologien oder sonstigen Innovationen im Markt bzw. der Gesellschaft insgesamt beeinflussen. Dies sind beispielsweise (potentielle) Adopter, wie z.B. Haushalte und Unternehmen, Intermediäre, wie z.B. Installateur:innen und Händler:innen, oder auch sogenannte Change Agents, wie z.B. Meinungsführer:innen, Multiplikator:innen oder Akteur:innen mit Einfluss auf wichtige Rahmenbedingungen. Im Projekt wurden die Modelle TAM-HH und Invert/EE-Lab erweitert um eine bessere Integration des empirischen Inputs, sowie die Kopplung zu den techno-ökonomischen Energiesystemmodellen zu ermöglichen

Um für die methodische Weiterentwicklung der Energiesystemanalyse eine maximale Breitenwirkung zu entfalten, war es das Ziel die Akteursmodelle möglichst technologiegenerisch auszurichten. Der Fokus lag dabei auf der Abbildung von Mechanismen, die für ganz unterschiedliche Technologien gleichermaßen relevant sind - beispielsweise der Verbreitung von Wissen und Informationen oder der Bildung von Meinungen und Einstellungen, die der Generierung und Diffusion von Innovationen zugrunde liegen. Die Mechanismen wurden theoriegeleitet auf Basis von verhaltenswissenschaftlichen Grundlagen identifiziert.

Um die Entwicklung und insbesondere die Diffusion von Technologien besser in Modellen abbilden zu können, wurde in MANIFOLD insbesondere die Modellierung der Heterogenität, des Entscheidungsverhaltens und der Interaktion von Akteur:innen verbessert. Der Fokus der Akteursmodelle lag diesbezüglich auf drei Aspekten:

- (1) Die Heterogenität und sich ergebende relevante Akteursstrukturen wurden in den Akteursmodellen einerseits dadurch abgebildet, dass die Modelle Akteursgruppen mit unterschiedlichen Funktionen im Innovations- und Energiesystem berücksichtigen. Darüber hinaus wurde auch die Heterogenität innerhalb der Akteursgruppen berücksichtigt und entsprechende Subgruppen abgebildet; z.B. Fürsprecher:innen und Gegner:innen oder Adopter und Intermediäre mit unterschiedlicher Offenheit gegenüber Neuerungen. Durch die Berücksichtigung der Heterogenität und Struktur der Akteure wurden insbesondere die Möglichkeiten zur Entwicklung und ex-ante Evaluation von zielgruppenspezifischen Politikmaßnahmen verbessert.
- (2) Weiterhin wurden die Grundstrukturen von Entscheidungsverhalten abgebildet, auf deren Grundlage erklärt werden kann, warum Akteur:innen zu bestimmten Subgruppen gehören. Eine technologiegenerische Modellstruktur erfolgte hierbei durch die Abbildung psychologischer und sozialwissenschaftlicher Theorien. Diese Theorien erklären Entscheidungen abstrakt, indem sie auf grundsätzlich relevanten Eigenschaften von Akteur:innen (z.B. Technikaffinität und Risikobereitschaft von Individuen oder F&E-Kooperation und Eigenforschung von Unternehmen) sowie ihre Rollen im Netzwerk (z.B. Meinungsmacher:innen / Informationsvermittler:innen) und Technologien (z.B. Einfachheit der Nutzung oder Kompatibilität mit bisherigem Verhalten) aufbauen. Die Anwendung der Akteursmodelle auf Fragestellungen zu konkreten Technologien wurde durch spezifischen sozialwissenschaftlich-empirischen Input möglich. Indem auf Theorien in der Modellstruktur aufgebaut wurde, konnte die Abbildbarkeit von nicht-monetären Einflussfaktoren verbessert werden (z.B. persönliche ideelle Werte und Interessen oder auch gesellschaftliche Normen sowie verfügbares Wissen). Dadurch kann zukünftig ein breiteres Spektrum von Ansatzpunkten für Politikmaßnahmen modelliert werden.
- (3) Die Abbildung der Interaktion zwischen unterschiedlichen Akteursgruppen und -subgruppen steht ebenfalls im Fokus der Akteursmodelle. Dies ist bedeutsam, da die Generierung und Diffusion von Technologien durch solche Interaktionen erst ermöglicht bzw. stark beeinflusst wird. Beispiele hierfür sind Aktivitäten in Wissens- und Kollaborationsnetzwerken bei der Entstehung von Innovationen, die unter anderem wesentlichen Einfluss auf die Innovationsdynamik haben. Ein weiteres Beispiel ist die Mund-zu-Mund-Propaganda zwischen Adoptern oder die gegenseitige Beeinflussung von Adoptern und Intermediären. Die detaillierte Abbildung solcher Interaktionsbeziehungen soll unter anderem dabei helfen, Maßnahmen zur Steigerung der Bekanntheit von Förderprogrammen oder der Akzeptanz von Politikmaßnahmen entwickeln und ex-ante evaluieren zu können, um dadurch ihre Effektivität zu steigern.
- (4) Abbildung von Politikakzeptanz: Da bei Analysen mit techno-ökonomischen Modellen in der Regel mehrere Szenarien mit unterschiedlichen Annahmen zu gesellschaftlichen und politischen Rahmenbedingungen untersucht werden, bietet sich hier ein Ansatzpunkt für eine qualitative Kopplung mit einem Akteursmodell, welches sozio-politische Akzeptanz abbildet. Solche Analysen ermöglichen Aussagen dazu, wie realistisch verschiedene zukünftige politisch-gesellschaftliche Rahmenbedingungen sind bzw. wie sich solche Rahmenbedingungen am ehesten erreichen lassen. Derartige Informationen stellen einen methodischen und praktischen Mehrwert für techno-ökonomische Analysen dar, der auch über eine qualitative Schnittstelle erzielt werden kann.

- (5) Ausrichtung auf sozialwissenschaftlich-empirischen Input: Analysen zur Innovations- und Diffusionsdynamik in konkreten Technologiebereichen werden dadurch möglich, dass die technologiegenerischen Akteursmodelle sozialwissenschaftlich-empirischen Input erhalten. Daher sollen Beiträge, die verschiedene sozialwissenschaftlich-empirische Methoden zum Verständnis von Heterogenität, Entscheidungsverhalten und Interaktion von Akteuren leisten können, systematisch aufgearbeitet werden. Die Strukturen der Akteursmodelle sollen darauf ausgerichtet werden, ein breites Spektrum an Daten und Ergebnissen aus quantitativen und qualitativen sozialwissenschaftlichen Untersuchungen unkompliziert aufnehmen zu können.
- (6) Modellkopplung durch anschlussfähigen Output: Mit der technologiegenerischen Ausrichtung der Akteursmodelle und ihrem Fokus auf Entscheidungsverhalten und Interaktion der Akteure geht einher, dass die spezifischen technologischen Details der betrachteten Innovationen nicht im Vordergrund stehen.

Die im Projekt entwickelten Modellkopplungen bzw. Modellerweiterungen mit den im Rahmen des Vorhabens (weiter-)entwickelten Akteursmodellen werden beispielhaft für einen ausgewählten Technologiebereich umgesetzt. Als Beispielsektor wird der Wärmebereich gewählt, da dieser in allen beteiligten Energiesystemmodellen ausreichend abbildbar ist. Zudem bietet dieser aufgrund der Heterogenität der Akteure und der Kleinteiligkeit der Investitionsentscheidung besondere Herausforderungen. Der Fokus liegt auf der Analyse der Wirkung von Politikinstrumenten in Energieszenarien auf Basis der veränderten Modellwelt. Ziel ist es dabei, insbesondere akteursspezifische Maßnahmen abzubilden, die bisher in Energiesystemmodellen nur unzureichend berücksichtigt werden konnten.

3 Wissensstand und Forschungslücke

3.1 Wissensstand bezüglich der Berücksichtigung von individuellem Verhalten und Einstellungen in techno-ökonomischen Modellen

Energiesystemmodelle (ESM) beantworten unterschiedliche Fragestellungen und verwenden daher unterschiedliche Methoden. Die Modelllandschaft kann in Top-Down (gesamtwirtschaftliche Perspektive; begrenzte Abbildung des Energiesystems), Bottom-Up (detaillierte Abbildung des Energiesystems) und hybride Modelle (die den Energiesektor als Modul enthalten) unterteilt werden, innerhalb derer unterschiedliche Methoden (z.B. ökonomisch, Optimierung) zum Einsatz kommen. Die Unterscheidung zwischen Bottom-up- und Top-down-Ansätzen ist weniger konzeptioneller Natur, sondern beruht eher auf dem unterschiedlichen sektoralen und technologischen Detaillierungsgrad.

Sozialwissenschaftliche Faktoren können in verschiedene Arten von ESM integriert werden. Für ein besseres Verständnis der Integrationsmöglichkeiten ist die Berücksichtigung einer weiteren Dimension relevant, nämlich ob die Modelle eine Mikro- oder Makroperspektive auf das Energiesystem einnehmen. Makromodelle untersuchen das gesamte Energiesystem in aggregierter Form, während Mikromodelle Handlungen und Entscheidungen aus der Perspektive eines bestimmten Sektors oder Akteurs darstellen. In der Kategorie der Makromodelle werden sowohl Energieoptimierungsmodelle (ESOM) als auch berechenbare allgemeine Gleichgewichtsmodelle (CGE) beschrieben. In der Mikroperspektive werden unter anderem Bottom-up Simulationsmodelle eingeordnet. Im Rahmen von Manifold wurde in Senkpiel et al. (2020) ein Modellüberblick veröffentlicht (siehe Anhang A.1.2). Dieser fasst für jede Modellkategorie die Zielsetzung, typische Input- und Outputdaten sowie Modellvertreter zusammen.

3.2 Empirische sozialwissenschaftliche Ergebnisse als Modellinput für Energiesystemmodelle

Im Rahmen von Manifold fand ein intensiver Diskurs zwischen den unterschiedlichsten Disziplinen statt. Als Ergebnis dieses interdisziplinären Diskurses unter Energie-Systemmodellierer:innen, und Expert:innen aus den Sozialwissenschaften, der Psychologie, der Ökonomie und Politikwissenschaft wurden folgende sozialwissenschaftliche Faktoren identifiziert, die in ESM berücksichtigt werden sollten: Investitionsverhalten, Nutzungsverhalten, sozio-politische Akzeptanz, Technologieentstehung und politische Rahmenbedingungen. In Senkpiel et al. (2020) werden diese Aspekte unter den folgenden Kriterien analysiert: (1) Motivation zur Berücksichtigung in ESM, (2) empirische Datenerhebung und (3) Methoden/Möglichkeiten zur Integration in ESM (Makro- und Mikroperspektive). Die Methoden zur Integration werden in direkten Modellinput, Monetarisierung und Soft-Linking mit anderen Modellen unterschieden. Soft-Linking bedeutet hierbei, dass keine direkte Schnittstelle oder Modelliterationen durchgeführt werden, sondern dass die Modellausgabe eines Modells in den Modelleingang des ESM übersetzt wird.

Es ist jedoch nicht oder nur kaum möglich, ein einzelnes Modell zu entwickeln, das alle Facetten des Energiesystems, einschließlich des sozialen Umfelds, berücksichtigt. Auf der Grundlage eines interdisziplinären Diskurses wurde im Rahmen von Manifold ein Vorschlag erarbeitet, wie die verschiedenen diskutierten Modelle miteinander gekoppelt werden können, um ein tiefes Verständnis der systemischen Zusammenhänge des Energiesystems und der Transformation des Energiesystems zu gewinnen.

Im Projekt Manifold wird der erarbeitete Modellkopplungsansatz für den Bereich Wärme angewendet. Hierzu werden verschiedene Modelle in Tabelle 1 miteinander verglichen.

Tabelle 1: Überblick über die im Projekt Manifold eingesetzten Modelle

Energiesystemmodelle:	
REMod (Fraunhofer ISE)	Das Modell REMod basiert auf einer kostenbasierten Strukturoptimierung der Transformation des deutschen Energieversorgungssystems für alle Verbrauchssektoren – also die Sektoren Strom, Niedertemperaturwärme (Raumwärme und Warmwasser), Prozesswärme und Verkehr.
TIMES (IER)	TIMES ist ein mehrperiodisches, lineares Optimierungsmodell, das auf einem prozesstechnischen Ansatz basiert, bei dem einzelne Anlagen im Energiesystem aggregiert abgebildet werden. Ziel ist die Ermittlung der wirtschaftlich optimalen Struktur des Energiesystems bei einem vorzugebenden Nutzenergie- bzw. Energiedienstleistungsbedarf und ggf. energie- und umweltpolitischen Vorgaben.
Strommarktmodell:	
ENERTILE (Fraunhofer ISI)	Das Modell ENERTILE ist ein techno-ökonomisches Modell zur detaillierten Optimierung des Stromsystems und basiert auf der Methodik der linearen Optimierung. Das Modell konzentriert sich auf den Stromsektor, deckt aber auch die Wechselwirkungen mit anderen Sektoren (z. B. Wärme und Verkehr) ab.
Diffusionsmodelle:	
TAM (IER)	Das (TAM) basiert auf dem TIMES-Modellgenerator, beinhaltet aber die TIMES-Akteursmodell detailliertere Charakterisierung der verschiedenen Akteure innerhalb der Angebots- und Nachfragesektoren. TAM verwendet das gleiche Grundkonzept wie TIMES und zielt auf die Ermittlung der wirtschaftlich optimalen Struktur des Energiesystems bei einem vorgegebenen Nutzenergie- bzw. Energiedienstleistungsbedarf und ggf. energie- und umweltpolitischen Vorgaben.
IN- VERT/EE- Lab (IREES)	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.
Technologiegenese:	

SKIN (IQIB GmbH) In dem agentenbasierten Technologiegenese-Modell interagieren Agenten mit heterogenen Eigenschaften in einer sich kontinuierlich verändernden Umgebung. Agenten im Modell sind vor allem Firmen und Forschungsinstitutionen, zum Beispiel im Bereich der Entwicklung von Wärmepumpen.

Maßnahmenakzeptanz

PANDORA (Fraunhofer ISI) Beim Modell PANDORA handelt es sich um ein agentenbasiertes Modell welches Akzeptanzprozesse simuliert, die sich angesichts einer neuen Politikmaßnahme abspielen. Das Modell wurde im Rahmen des Projektes neu entwickelt

4 Entwicklung der Schnittstellen zwischen den Modellen und zur Empirie

Um die Schnittstellen zwischen den Modellen untereinander sowie zwischen den Modellen und der Empirie zu analysieren, wurden zunächst die techno-ökonomischen Modelle REMod, TIMES, TAM, Invert/eeLab und ENERTILE hinsichtlich ihres verwendeten-Inputs und Outputs miteinander verglichen.¹ Parallel erfolgte eine Literaturrecherche zu bereits verwendeten sozialwissenschaftlichen Methoden zur Kopplung mit Energiesystemmodellen. Gleichzeitig wurden die sozialwissenschaftlichen Faktoren präzisiert, die in techno-ökonomischen ESM integriert werden sollten. Hierzu zählen: Investitionsverhalten, Nutzerverhalten, lokale Akzeptanz, Technologieinnovation sowie sozio-politische Akzeptanz. Es wurde herausgearbeitet, welche Motivation, Möglichkeiten der empirischen Datenerhebung und Möglichkeiten der Modellintegration für die oben genannten Faktoren es gibt und aufgezeigt wie eine mögliche Modellkopplung aussehen könnte. Eine sinnvolle Kategorisierung von Mikro- und Makrosystem Perspektive wurde erarbeitet, da sich hier Unterschiede der direkten Integration sozialwissenschaftlicher Faktoren sowie der Kopplung mit Akteursmodellen zeigen. Die Arbeiten hierzu sind im Artikel von Senkpiel et al. (2020) unter dem Titel „Integrating methods and empirical findings from social and behavioural sciences into energy system models – motivation and possible approaches“ in dem special issue „energy systems and model coupling“ zusammengefasst (siehe Anhang A.1.2).

Im Rahmen der Schnittstellendiskussion zeichnete sich ab, dass durch die Heterogenität der Modelle universelle Schnittstellen nicht sinnvoll sind. Vielmehr sind diese abhängig von den jeweiligen Modellen. So kann beispielsweise das Akteursmodell PANDORA die Akzeptanz des politischen Szenarienrahmens für die anderen Modelle liefern. Die Schnittstelle für das Innovationsmodell SKIN liegen eher bei einzelnen Faktoren wie der Wissensverbreitung zur Aufnahme in bestimmte Modelle (wie TIMES oder InvertEE/Lab).

Im Folgenden wird zunächst die im Projekt umgesetzte Modellkopplung beschrieben. Darauf folgt die Darstellung der Modellentwicklungen und -erweiterungen, welche insbesondere der Integration der empirischen Daten sowie der Modellkopplung dienen. Des Weiteren wird in diesem Kapitel die sozialwissenschaftliche Empirie sowie ihre Schnittstellen zu den Modellen dargelegt.

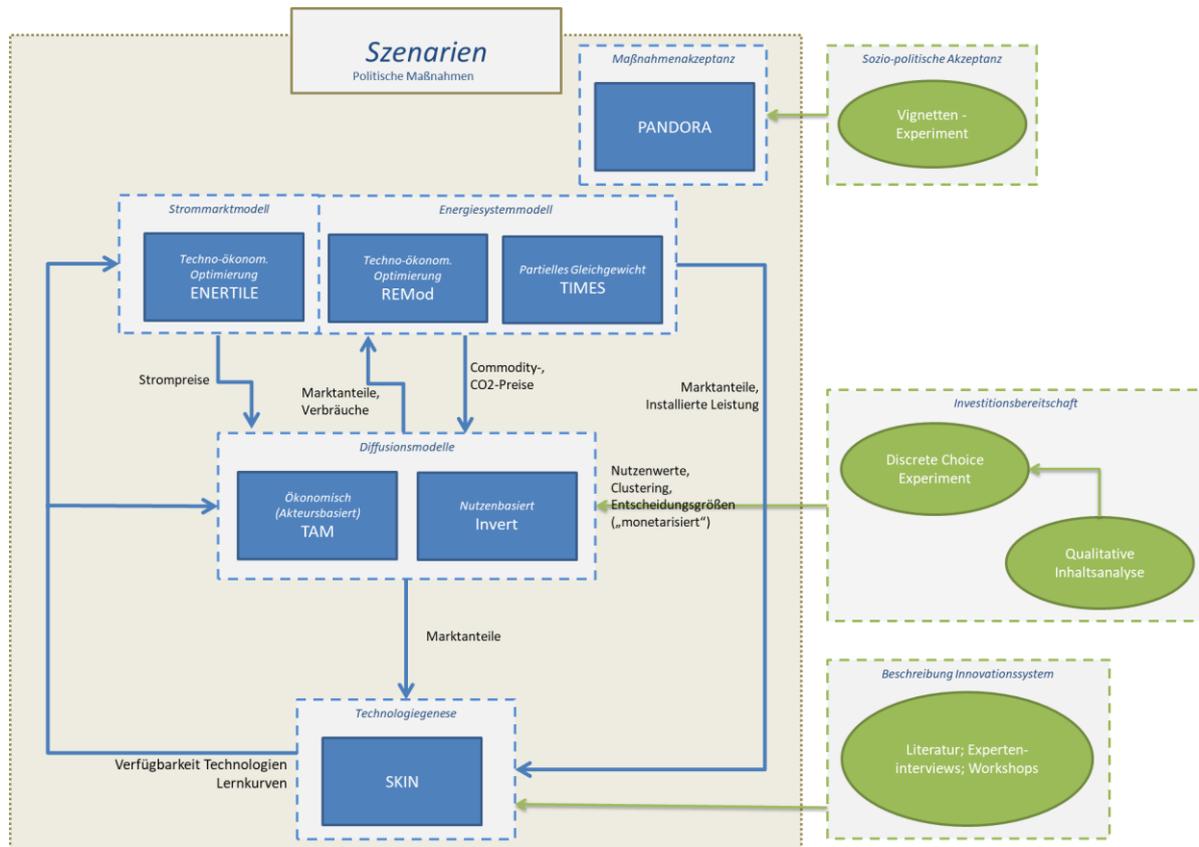
4.1 Modellkopplung

In einem detaillierten Austausch zu den verschiedenen Schnittstellen zwischen Empirie, Akteursmodellen und techno-ökonomischen Modellen wurde ein Kopplungsschema erarbeitet.

Abbildung 2 zeigt die jeweiligen Schnittstellen und vorgesehenen Modellkopplungen, welche ein tieferes Verständnis für die systemischen Zusammenhänge des Energiesystems und einer Transformation desselben ermöglichen sollen.

¹ Folgende Kriterien wurden bei dem Vergleich berücksichtigt: Methode, Kategorie, Zeitfokus, Perfect foresight, zeitlicher Betrachtungshorizont, zeitliche Auflösung, räumliches Untersuchungsgebiet, räumliche Art der Systemperspektive, Sektoren, Ergebnis, volkswirtschaftliches Modell, endogene Berechnung Strombedarf, endogene Berechnung Wärme- bzw. Brennstoff-Bedarf, endogene Berechnung Mobilitätsbedarf (Verkehrsleistung), endogene Berechnung Investitionen Stromerzeugung, endogene Berechnung Investitionen, Wärmeerzeugung endogene Berechnung Entwicklung Fahrzeugflotte (Straße, Schiene, Luft), endogene Berechnung Flexibilitätsbedarf (DSM, Speicher, ...), Simulation Stromnetz, Betrachtung Wirtschaftlichkeit, Berücksichtigung Verhalten/Akteure, Umgang mit Unsicherheit, Sektorkopplung, Untersuchungsgegenstand und Kern-Fragestellung, Modell Input, Modell Output.

Abbildung 2: Modellschnittstellen und Modellintegration im Projekt Manifold



Gemeinsam entwickelte Szenarien bilden den Rahmen für die Modellkopplung. Die Determinanten dafür werden so ausgewählt, dass sie den verschiedenen Modellen gemein sind. So werden die technologischen und wirtschaftlichen Annahmen zu Preisentwicklungen, Kostenentwicklungen, Lebensdauern oder Wirkungsgraden harmonisiert und mögliche Korridore bestimmt. Auch politische Rahmenbedingungen werden in den Szenarien definiert. Die Szenarien sind im Detail in Kapitel 6 dargestellt.

Ein Aspekt ist die gesellschaftspolitische Akzeptanz der Bürger:innen für die unterschiedlichen Politikmaßnahmen, die die Machbarkeit der Maßnahmen und deren Umsetzungswahrscheinlichkeit beeinflusst. Empirische Erkenntnisse über die gesellschaftspolitische Akzeptanz wurden durch Umfragen und andere quantitative und qualitative Methoden gewonnen. Durch die Kombination dieser Eingaben in eine agentenbasierte Simulation konnte die Durchführbarkeit von unterschiedlichen politischen Rahmenbedingungen analysiert werden. Hierfür wurde innerhalb des Projektes das Modell PANDORA (Policy Acceptance, Diffusion of Opinions and Relations among Actors) entwickelt. Dieses Modell formalisiert theoretische Konzepte zur Akzeptanzbildung in der Gesellschaft in einem agenten-basierten Modell und baut den empirisch gewonnenen Daten auf.

Politische Rahmenbedingungen können gezielte Technologieforschung fördern, wie zum Beispiel das Energieforschungsprogramm der Bundesregierung oder der Strategieplan für Energietechnologie (SET) der Europäischen Union. Durch gezielte Forschung und Informationskampagnen werden bestimmte Technologien bei verschiedenen Akteuren beworben. Neben der Technologiegenese ist die Wissensdiffusion ein wichtiger Treiber für die tatsächliche Etablierung der Technologie auf dem Markt. Dazu gehören Herstellende, aber auch Techniker:innen und Handwerker:innen, die Investitionsentscheidungen der Einzelnen beeinflussen. Für die Parametrisierung des Technologiegenesemodells SKIN waren empirische Untersuchungen (Interviews, Workshops, Experten, etc.) notwendig,

um Prozesse und Akteure zu charakterisieren und das Modell an beobachteten Innovationsnetzwerkstrukturen, aber auch an möglichen zukünftigen Marktanteilen der Technologie zu kalibrieren. Im Ergebnis liefert das Innovationsmodell Informationen über Auswirkungen implementierter Maßnahmen auf die zeitliche Verfügbarkeit und auf Lernkurven von Technologien, die als Input für Energiesystemmodelle und Diffusionsmodelle dienen. Darüber hinaus kann der abgeschätzte Wissensstand über innovative Technologien von Installateur:innen und Handwerker:innen genutzt werden, um die Modellierung der Technologiediffusion zu verbessern.

Die Marktakzeptanz bzw. Technologiediffusion kann auf Basis von mikroperspektivischen Energiesystemmodellen simuliert oder optimiert werden. Discrete Choice-Experimente (DCE) sind ein nützliches Instrument zur empirischen Datenerhebung, da diese das Investitionsverhalten innerhalb eines Experiments abbilden und Nutzwerte ermitteln können. Das Ergebnis des Mikroperspektivenmodells ist die Marktdurchdringung von Technologien wie Heizungsanlagen, Anteile von Heizungsanlagen und Sanierungsraten auf Basis des Investitionsverhaltens unter bestimmten Bedingungen. Wenn das Zielsystem ohne Berücksichtigung des Investitionsverhaltens betrachtet wird, kommen die meisten Energiesystemmodelle zu dem Ergebnis, dass Wärmepumpen sowie eine netzgebundene Wärmeversorgung bei gleichzeitiger Anhebung des Energiestandards von Gebäuden die Lösung bei der Transformation des Wärmesektors sind.

Umgekehrt ist die Kopplung auch in die andere Richtung möglich: Welche Rahmenbedingungen müssen gegeben sein, um ein zukünftiges Zielsystem zu erreichen? Es ist zu beachten, dass bei dieser Art der Modellkopplung keine sukzessive Modellfolge präsentiert wird. Vielmehr wird das Wissen aus den verschiedenen Modellen und deren Ergebnissen sowie die Erkenntnisse aus empirischen Erhebungen durch die Schaffung von Schnittstellen zwischen den Modellen nutzbar gemacht. Der interdisziplinäre Diskurs verdeutlichte die Potenziale und Möglichkeiten der Modellkopplung. Insgesamt wird die Analyse zu einem bestimmten Thema, wie zum Beispiel der Wärmeversorgung, durch die Verwendung verschiedener Modelle und die Berücksichtigung von Erkenntnissen aus verschiedenen Bereichen der Transformation deutlich bereichert.

Einen Überblick über die Spezifikation der Schnittstellen zwischen der Empirie und den einzelnen Modellen liefert das Meilenstein-Dokument 4 (A.1.3). Hier wurden die Anforderungen an den empirischen Input für die (Akteurs)Modelle definiert und die Schnittstellen zwischen den Akteurs- und Diffusionsmodellen PANDORA, SKIN, TAM und Invert/EE-Lab, den Energiesystemmodellen REMod und TIMES, und dem Strommarktmodell ENERTILE konkretisiert. Das Kopplungsschema diente hierbei als Input zur Modellentwicklung in AP3 (Technologiegenese) und AP4 (Technologiediffusion, Politikakzeptanz), der empirischen Datenerhebung in AP5 sowie der Umsetzung in AP6. Im Folgenden sind die Modellerweiterungen und wesentlichen Schnittstellen dargestellt.

4.2 Modellentwicklungen und -erweiterungen entsprechend der definierten Schnittstellen

4.2.1 Erweiterung Technologiegenesemodell

Mit SKIN („Simulating Knowledge Dynamics in Innovation Networks“) wurde im Projekt von einem Technologiegenesemodell ausgegangen, das bereits vielfach für Analysen in dem Bereich von Innovationsnetzwerken eingesetzt wurde. Um den Anforderungen im Projekt entsprechen zu können, musste allerdings ein neues Modell entwickelt werden. Viele Prozesse und Mechaniken sind den Ansätzen im SKIN-Modell ähnlich.

Im Sinne eines Co-Designs wurden zunächst die Schwerpunkte der Modellierungen zur Technologiegenese aus Interviews und einem Workshop abgeleitet, in dem wesentliche Aspekte des tech-

nologischen Innovationssysteme der betrachteten Technologien - Wärmepumpe und Brennstoffzelle - erarbeitet wurden. Aus einem weiteren Austausch und der Abstimmung mit den anderen Modellen wurden Schnittstellen identifiziert, die bei der Modellentwicklung in den Fokus genommen wurden. Eine Schnittstelle war die Aus- und Weiterbildung von Installateur:innen und damit die technologischen Portfolien von Geräten, die installiert werden können. Für eine Verbesserung der Abbildung von Lernprozessen und die Modellierung von Lernkurven als wesentliche Schnittstelle war es zusätzlich notwendig, den Kern des Modells neu zu entwickeln. Aus SKIN wurde so das neue Modell SLICK.

Eine detailliertere und umfassendere Beschreibung von SLICK ist in Meilenstein-Dokument 6 (Anhang A.1.5) zu finden.

4.2.2 Erweiterung der Diffusionsmodelle

In Energiesystemmodellen wird bislang die Entstehung von Technologien typischerweise nicht explizit erfasst, sondern über mögliche Technologieoptionen und ihre technisch-ökonomische Charakterisierung im Zeitverlauf exogen vorgegeben. Eine ausführliche Darstellung des bisherigen Wissens- und Implementationsstandes ist im Meilenstein-Dokument 6 und 7 verfasst (siehe Anhang A.1.5). Im Folgenden wird in Kürze die Umsetzung in MANIFOLD dargestellt.

Invert/ee-lab

Der Fokus in der Erweiterung von **Invert/ee-lab** lag in einer direkten Abbildung der empirischen Ergebnisse zur Wahlentscheidung von Wärmeversorgungssystemen über das Discrete-Choice Experiment sowie in der Abbildung der Marktdynamiken, die nicht direkt über die Simulation der Investitionsentscheidung abgebildet werden können. Die Integration der DCE Ergebnisse wird über eine Modellanpassung realisiert. Der Algorithmus zur Simulation der Investitionsentscheidung in Wärmeversorgungssysteme in Invert/ee-lab basiert auf einem Logit-Modell, wodurch grundsätzlich eine hohe Passbarkeit mit dem DCE bereits vorhanden ist. Dieser Ansatz eignet sich gut für eine generische Definition oder eine Ableitung von relativen Gewichtungsfaktoren aus der Literatur, da relative Gewichtung der einzelnen Entscheidungskriterien über die Gewichtungsfaktoren direkt sichtbar erscheint. Allerdings ist durch die Normierung der Parameterausprägung in Teilnutzenwerte keine direkte Implementierung von Ergebnissen eines DCE gegeben und die direkte Integration empirischer Ergebnisse zu Entscheidungsfindung ist nicht möglich. Im Rahmen von Manifold ist der Simulationsalgorithmus von Invert/es-lab daher erweitert worden, so dass die aus der DCE resultierenden empirisch gewonnen Parameter direkt in das Modell eingehen. Die Beta-Parameter aus dem DCE beinhalten neben der relativen Gewichtung der Entscheidungskriterien zueinander auch gleichzeitig die Transformation bzw. Normierung der Parameterausprägungen zueinander. Damit können beispielsweise die Relevanz von Investitionskosten in Verhältnis zu Energieeinsparungen oder dem Betriebsaufwand gesetzt werden, obwohl diese Parameter über unterschiedliche Einheiten verfügen. Für Anpassung im Modell wird dazu eine neue Agentenklasse „Manifold-Agent“ programmiert, für die der neue Simulationsalgorithmus aufgerufen wird. Alle Agenten, die im Modell dieser Agentenklasse zugeordnet sind, verwenden die definierten Beta-Gewichtungsfaktoren direkt in der Nutzwertkalkulation, ohne eine Transformation der Ausprägung auf eine einheitliche Skala vorzunehmen. Der ursprüngliche Algorithmus bleibt zudem erhalten und es können Vergleiche zwischen den unterschiedlichen Ansätzen modelliert werden. Die zweite Erweiterung betrifft die Integration der Marktdynamiken, die sich durch Einfluss von Change-Agents und der Verfügbarkeit von Technologien ergeben. Hier sind im Rahmen des Projektes verschiedene Ansätze mit der Kopplung von Invert/ee-lab und SLICK eruiert worden. Eine vertiefte Implementierung im Invert/ee-lab Modell ist über eine direkte Abbildung der Installateure möglich und wurde entsprechend auch konzipiert und weiterentwickelt. Bei der Konkretisierung des Manifold-Modellansatzes sind die Dynamiken bei der Aus- und Weiterbildung der Installateure stärker in Verbindung mit

dem gesamten Innovationssystem im SKIN Modell implementiert worden. Die Kopplung der SKIN-Ergebnisse mit dem Invert/ee-lab Modell erfolgt über ein logistisches Marktdiffusionsmodell, das mit den Ergebnissen von SKIN parametrisiert wird.

TAM

Der Fokus der Betrachtung in MANIFOLD war die Definition der notwendigen Input-Größen von SLICK als Input in TAM-HHs. Das Modell SLICK wird im Meilenstein-Dokument 6 (Anhang A.1.5) vorgestellt. Grundsätzlich kann für die Integration der Ergebnisse aus SLICK folgendes Vorgehen methodisch durchgeführt werden: Inwieweit wirkt sich eine unterschiedliche Aufteilung des Budgets für Installateur:innen, Subventionen und Ausgaben für F&E für Brennstoffzellen und Wärmepumpen auf die Modellierungsergebnisse von TAM-HHs aus?

4.3 Sozialwissenschaftliche Empirie und Schnittstellen zu den Modellen - Qualitative Interviews und Discrete Choice Experimente

Qualitative Interviews als Methode eignen sich aufgrund der möglichen Tiefe der Befragung, um neue Informationen über einen Gegenstandsbereich zu bekommen. Für die Fragestellung, welche Aspekte einen Einfluss auf das Auswahlverhalten beim Kauf von Heiztechnologien haben, konnten die Ergebnisse der qualitativen Interviews eingesetzt werden, um bereits als relevant bekannte Konsequenzen für Kaufentscheidungen zu ergänzen und neue Aspekte zu beleuchten. Schnittstellenaufgabe der qualitativen Interviews war es, die Auswahl der Attributdimensionen im DCE zu begründen und zu ergänzen, da in den DCE kein tatsächliches, sondern hypothetisches Wahlverhalten abgebildet wurde.

Als Vorbereitung für die Schnittstelle zwischen qualitativen Interviews und den DCE wurde im Rahmen des Forschungsnetzwerktreffens Systemanalyse ein Posterbeitrag zum Prozess der Methodenintegration (Wille, Kockel, Nolting, 2021) erarbeitet und zur Diskussion gestellt.

Die in der qualitativen Analyse als relevant herausgearbeiteten Konsequenzen für das Wahlverhalten beim Kauf von Heiztechnologien wurden gemeinsam diskutiert und vor dem Hintergrund der übergeordneten Projektinteressen, wie z.B. der Frage nach der Rolle von Politikinstrumenten, eine Auswahl getroffen.

Während qualitative Interviews bereits einen wertvollen Beitrag leisten, um die Entscheidungssituation bei der Auswahl eines Heizsystems nachvollziehen zu können, bedarf die Berücksichtigung in Diffusionsmodellen einer quantitativen Abschätzung des Einflusses unterschiedlicher Faktoren. Dafür wurde an der RWTH Aachen ein DCE entwickelt und im Rahmen einer Online-Umfrage durchgeführt, welches es ermöglicht, Zahlungsbereitschaften für monetäre und nicht-monetäre Attribute von Heizungstechnologien zu schätzen. Bei dem Experiment wurden Befragte zunächst mit dem Szenario einer anstehenden Investitionsentscheidung für ein neues Heizungssystem vertraut gemacht. Die Proband:innen wurden dann in eine Entscheidungssituation versetzt und erhielten als Wahlmöglichkeit – auch Choice Set genannt – eine Reihe von verschiedenen Alternativen, aus denen sie auswählen mussten. Dabei wurde jede Alternative durch vordefinierte Attribute beschrieben. Die Anzahl der Attribute, die in einem DCE integriert werden können, ist begrenzt. Eine vorab begründete Auswahl ist daher von hoher Relevanz, um die Auswahl-situation angemessen abzubilden. Das gilt insbesondere, da es sich bei DCE um fiktive und nicht tatsächliche Auswahl-situationen handelt. Der Bezug zu konkreten Auswahlentscheidungen nimmt eine wichtige Brückenfunktion ein. Denn obwohl ein DCE Gewichtungen liefert, kann es keine Argumentation dafür liefern, warum ein bestimmtes Merkmal in einer Auswahl-situation relevant sein sollte oder nicht. Neben den Erkenntnissen der durchgeführten Pilotstudie, bedingten daher insbesondere die Ergebnisse der qualitativen Interviews die Auswahl der Attribute des DCE.

Als Ergebnis des DCE liegen gegeneinander gewichtete Präferenzen der Befragten für die zuvor ausgewählten Attribute vor. Um diese Präferenzen leichter interpretierbar zu machen und in den Diffusionsmodellen berücksichtigen zu können, wurden die Daten in zwei Schritten weiterverarbeitet. Zunächst wurden die Präferenzen in Zahlungsbereitschaften übersetzt. Anschließend wurde der Einfluss des soziodemographischen Hintergrundes der Befragten auf diese Zahlungsbereitschaften und die gewichteten Präferenzen analysiert. Im Detail ist das theoretische Vorgehen im Meilenstein-Dokument 4 sowie Senkpiel et al. (2020) dargestellt sowie das spezifische Vorgehen und die Ergebnisse im Meilenstein-Dokument 5 beschrieben.

Im Rahmen der formulierten Modellkette fanden die ermittelten Investitionsbereitschaften Eingang in die Diffusionsmodelle TAM und Invert/ee-lab (vgl. Kapitel 4.2.2). Sie ermöglichen dort eine adäquate Berücksichtigung von monetären und nicht-monetären Präferenzen in Abhängigkeit ausgewählter soziodemographischer Faktoren.

4.4 Schnittstelle zwischen den Energiesystemmodellen und Invert zu SLICK

Mit SLICK erfolgt eine Modellierung der Technologieentstehung aus der Entwicklung von Wissen und damit neuen Technologien, im Zusammenspiel zwischen Forschungsinstitutionen und Unternehmen. Wird ein Produkt gut am Markt verkauft, war die Entwicklung erfolgreich. Ergebnisse des Modells sind die am Markt angebotenen Produkte. Für die Modellierung der Nachfrage werden Energiesystemmodelle bzw. das Diffusionsmodell Invert/EE genutzt. Aus der sich dort ergebenden Nachfrage nach Produkten bestimmter Eigenschaften ergibt sich ob die produzierten Technologien verkauft werden können. Bei erfolgreichem Verkauf wird das Produkt weiterproduziert. Ist der Verkauf nicht erfolgreich wird zunächst der Preis angepasst. Gleichzeitig dient der Output der systemischen Nachfrage nach bestimmten Heiztechnologieprodukten aus dem Diffusionsmodell INVERT/EE als wichtiger Input für SLICK.

Eines der Hauptziele im Rahmen von Manifold war die Entwicklung einer Modellarchitektur, die verschiedene Teile der Funktionsweise des Energiesystems darstellt. Innerhalb dieser Architektur bestand die Rolle von SLICK darin, Informationen zur Genese verschiedener innovativer Energietechnologien zu liefern. Schwerpunkte waren die zeitliche Entwicklung der Kosten, die mit der Produktion ausgewählter Heiztechnologien verbunden sind sowie die Verfügbarkeit von Installateur:innen, die in der Lage sind, die hergestellten Heiztechnologieprodukte zu installieren.

Die zeitliche Entwicklung der Kosten für die Technologieproduktion (Lernkurve) wird von verschiedenen Faktoren beeinflusst, die mit der Erlangung und Verteilung von spezifischem Wissen innerhalb und zwischen verschiedenen Akteuren zusammenhängen. Diese Zusammenhänge werden in SLICK modelliert. Solche Lernkurven werden von anderen Modellen, wie typischen Energiesystemmodellen, als eine wichtige Information genutzt um die Nachfrage nach bestimmten Heiztechnologieprodukten zu ermitteln. Diese systemischen Nachfragen nach Produkten wiederum, die in solchen Modellen als Output produziert wird, wird in SLICK als Input benötigt, um das nachfolgende Verhalten der verschiedenen Akteurstypen zu bestimmen, einschließlich der Handlungen von Technologieherstellenden und Installateur:innen. Hier können sowohl Technologieherstellende als auch Installateur:innen ihre technologische Ausrichtung als Folge der sich ändernden Nachfragemuster entweder verstärken oder diversifizieren. Die Ergebnisse von SLICK zu Lernkurven und maximalen Diffusion von Technologien werden in Invert/ee-lab und Tam in unterschiedlicher Weise implementiert wie in Kapitel 4.2.2 beschrieben.

Der Endenergiebedarf für Raumwärme und Warmwasser in Gebäuden wurde von Invert/ee-lab berechnet. Für jedes Szenario wurde die Gesamtnachfrage nach Strom und Fernwärme als Input für Enertile verwendet und die Bereitstellung dieser Energieträger optimiert. Die folgenden jährlichen

Bedarfswerte aus Invert/ee-lab wurden in Enertile verwendet: Fernwärmebedarf, Strombedarf aus Wärmepumpen und sonstiger Strombedarf (Stromheizungen und Hilfsenergie). Diese Bedarfsmengen werden separat für die Sektoren Privathaushalte und Gewerbe, Handel, Dienstleistungen (GHD) bilanziert. In Remod sind neben der Entwicklung des Endenergiebedarfs zusätzlich noch die modellierten Marktanteile für die Entwicklung der Wärmeversorgungssysteme aus Invert/ee-lab übernommen worden.

4.5 Modellierung sozio-politischer Akzeptanz

Das agentenbasierte Modell (ABM) PANDORA wurde im Rahmen von Manifold neu entwickelt. Es bildet die gesellschaftliche Akzeptanz von neuen Politikmaßnahmen ab, welche auf die Diffusion energieeffizienter Heiztechnologien im Gebäudesektor abzielen. Im Rahmen dieses Modells werden theoretische sowie empirische Elemente kombiniert. Das Modell widmet sich der Frage was passiert, wenn die Ergebnisse einer empirischen Studie zur Wahrnehmung von Politikmaßnahmen weiterentwickelt und mit dynamischen sozialen Effekten kombiniert werden. Hierbei wird angenommen, dass die Wahrnehmung von Politikmaßnahmen ein wesentlicher Faktor ist, der die persönliche, innere Einstellungsbildung zu einer Politikmaßnahme vermittelt. Die Annahme des Modells ist, dass die öffentliche Meinung hauptsächlich durch den Diskurs in sozialen Netzwerken und Medien beeinflusst wird. ABM wie PANDORA nutzen empirische Daten zur Verfeinerung ihrer Parameter und zur konzeptionellen Validierung. Die konzeptionelle Entwicklung von PANDORA erfolgte in weiten Teilen analog zur Konzipierung der empirischen Datenerhebung („Vignetten-Experiment“), sodass die Ergebnisse daraus direkt als Input in das Modell integriert werden konnten. Die Modellbeschreibung ist im Meilenstein-Dokument 5 zu finden (Anhang A.1.4).

5 Ergebnisse der empirischen, sozialwissenschaftlichen Analysen

Die direkte Integration der empirischen Ergebnisse erfolgt über die Akteurs-Modelle SKIN (SLICK), TAM/Invert und PANDORA. Der Manifold-Bericht zum Meilenstein-Dokument 5 (Anhang A.1.4) dokumentiert die Ergebnisse der im Rahmen von Manifold durchgeführten empirischen Studien und konkretisiert auf welche Weise diese als Input für die Akteurs-Modelle dienen. Im Folgenden sind die empirischen Ergebnisse und deren Integration in die Modelle in Kürze dargestellt.

5.1 Empirischer Input Technologiegenesemodell

Für die Parametrisierung des Technologiegenesemodells SKIN, bzw. des im Rahmen des Projektes neu entwickelten Modells SLICK ("Simulating Learning Curves via Knowledge modeling") wurden empirische Untersuchungen (Dokumentenanalysen, Interviews, Workshops, Expert*innen, etc.) durchgeführt, um Prozesse und Akteure zu charakterisieren und das Modell an beobachteten Innovationsnetzwerkstrukturen, aber auch an möglichen zukünftigen Marktanteilen der Technologie zu kalibrieren. Auf Basis der Ergebnisse werden modellierte Prozesse gestaltet, die Modellauflösung gewählt und die Parametrisierung des Modells erarbeitet. Die qualitativen Ergebnisse werden dabei unterstützt durch quantitative Daten aus Statistiken zu Unternehmen und Branchen, Patenten, Forschungs- und Entwicklungsprogrammen. Aus ihnen werden Zahlen abgeleitet, die im Modell direkt verwendet werden können.

Eine detailliertere und umfassendere Beschreibung der gesammelten Daten, die für SLICK verwendet werden, ist im Meilenstein-Dokument 4 ("Empirie und Modellschnittstellen" - Anhang A.1.3) und im Meilenstein-Dokument 5 ("Empirische Arbeiten zur Verbesserung der Technologiegenesemodellierung" - Anhang A.1.4) enthalten.

5.2 Ermittlung der Investitionsbereitschaft für die Diffusionsmodelle

Die Marktakzeptanz bzw. Technologiediffusion kann auf Basis von mikroperspektivischen Energiesystemmodellen simuliert oder optimiert werden. Das Ergebnis des Mikroperspektivenmodells ist die Marktdurchdringung von Technologien wie Heizungsanlagen, Anteile von Heizungsanlagen und Sanierungsraten auf Basis des Investitionsverhaltens unter bestimmten Bedingungen. Discrete Choice-Experimente (DCE) sind ein nützliches Instrument zur empirischen Datenerhebung, da diese das Investitionsverhalten innerhalb eines Experiments abbilden und Nutzwerte ermitteln können. Ergänzt wurde das DCE durch qualitative Interviews. Die Ergebnisse der Inhaltsanalyse wurden in das Umfragedesign des DCE aufgenommen.

Die Interviews für die qualitative Inhaltsanalyse zum Kaufverhalten von erneuerbaren Heiztechnologien wurden vom 26.04.2021 bis 07.06.2021 durchgeführt. Die Zielgröße von zehn Interviews wurde erreicht. Bei den Teilnehmenden handelte es sich um eine early adopter Gruppe, die Kaufentscheidungen im Kontext von Renovierungs- und Reparationsarbeiten im Eigenheim getroffen haben. Die wesentlichen Ergebnisse sind eine Beschreibung der Verhaltensweisen und deren zeitliche Dauer während der Planungs- und Umsetzungsphase beim Heizungskauf, eine Gewichtung der für die Entscheidung relevanten individuellen Konsequenzen, sowie eine Gewichtung der relevanten Konsequenzen in Interaktion mit Installateur:innen. Die Gewichtungsergebnisse und Informationen über zeitliche Abläufe wurden genutzt, um die Auswahl und Gestaltung der Attribute im DCE zu informieren.

Der Lehrstuhl für Energiesystemökonomik der RWTH Aachen war verantwortlich für die Untersuchungen im Rahmen des DCE.

Dabei wurde im Herbst 2020 eine Pilotstudie mit repräsentativer Stichprobe durchgeführt. Die Erkenntnisse dieser Pilotstudie, sowie die Ergebnisse der durch die Technische Universität Braunschweig durchgeführten qualitativen Interviews flossen in das Design der finalen Umfrage ein, welche im Februar 2022 durchgeführt wurde. Im Rahmen dieser Online-Umfrage wurde eine weitere repräsentative Stichprobe von 2200 (2052 nach Bereinigung) Teilnehmende befragt. Wie in der Pilotstudie wurden neben dem eigentlichen DCE auch Präferenzen in Form einer Likert-Skalen-Befragung, sowie soziodemographische Informationen erfasst. Die erhobenen Daten wurden anschließend statistisch ausgewertet. Aus den DCE Daten wurden Nutzungspräferenzen für die Attribute von Heizsystemen mithilfe eines Mixed Logit Modells geschätzt.

Tabelle 2: Ergebnisse des Discrete Choice Experimentes für die gesamte Stichprobe

Attribut	β_a	WTP ² [EUR]	Interpretation
CO₂-Emissionsreduktion	0,008	60	Zahlungsbereitschaft für ein Prozent CO ₂ -Reduktion im Vergleich zum Heizen mit Erdgas ³
Eigenrecherche	-0,169	-1271	Zahlungsbereitschaft im Vergleich zu Informationsbezug vollständig durch Fachinstallateur*in
Eigenrecherche-Fachinstallateur*in	-0,263	-1977	
Fachinstallateur*in-Eigenrecherche	-0,143	-1075	
Investitionskosten	-0,133		Referenzwert
Betriebskosten	-1,856	14	Zahlungsbereitschaft für Senkung der jährlichen Betriebskosten um einen EUR
Politiksignal	0,536	4030	Zahlungsbereitschaft für positives politisches Fördersignal
Betriebsaufwand	-0,062	466	Zahlungsbereitschaft für Senkung des jährlichen zusätzlichen Betriebsaufwands um eine Stunde

Tabelle 2 zeigt die Ergebnisse der Auswertungen für die im DCE enthaltenen Attribute. Der Gewichtungsparemeter β_a gibt die relative Wichtigkeit eines einzelnen Attributes a für die Entscheidungssituation, im Verhältnis zu den anderen Attributen an. Eine Interpretation des absoluten Wertes von β_a ist hingegen nicht möglich und die Interpretation der Relationen zwischen den einzelnen Attributen hängt von den jeweiligen Einheiten ab. Für eine einfachere Interpretierbarkeit sowie für die Übergabe in die Diffusionsmodelle, wurden die Ergebnisse deshalb in Zahlungsbereitschaften (WTP) umgerechnet wie in Formel (1) angegeben.⁴

² Teilweise wurden die Vorzeichen der angegebenen Zahlungsbereitschaften (WTP) geändert, um eine leichtere Interpretierbarkeit der Ergebnisse zu ermöglichen.

³ Auch beim Heizen mit Erdgas gibt es deutliche Unterschiede in den CO₂-Emissionen, bspw. zwischen einem Niedrigtemperaturkessel und einem Brennwertkessel. Im Umfragedesign wurde diese Differenzierung aus Gründen der Komplexitätsreduktion für die Teilnehmenden nicht vorgenommen.

⁴ Für diese Berechnung wird die relative Wichtigkeit β_a eines Attributes a in Verhältnis zur relativen Wichtigkeit β_c eines anderen Attributes gesetzt, welches mit einer monetären Einheit in die Regression eingegangen ist. Das entsprechende Verhältnis entspricht dem Verhältnis der Grenznutzen und damit der Grenzrate der Substitution beider Attribute. Für die Berechnungen der vorliegenden Zahlungsbereitschaften wurden die Investitionskosten als monetäres Attribut c verwendet. Dies führt dazu, dass die jeweilige Zahlungsbereitschaft WTP_a für Attribut a ebenfalls als monetärer Wert interpretiert werden kann.

$$WTP_a = - \frac{\frac{\partial U}{\partial a}}{\frac{\partial U}{\partial c}} = - \frac{\beta_a}{\beta_c} \quad (1)$$

Für diese Berechnung wird die relative Wichtigkeit β_a eines Attributes a in Verhältnis zur relativen Wichtigkeit β_c eines anderen Attributes gesetzt, welches mit einer monetären Einheit in die Regression eingegangen ist. Das entsprechende Verhältnis entspricht dem Verhältnis der Grenznutzen und damit der Grenzrate der Substitution beider Attribute. Für die Berechnungen der vorliegenden Zahlungsbereitschaften wurden die Investitionskosten als monetäres Attribut c verwendet. Dies führt dazu, dass die jeweilige Zahlungsbereitschaft WTP_a für Attribut a ebenfalls als monetärer Wert interpretiert werden kann.

Neben dem DCE wurden auch die Antworten zu den Präferenzbekundungen im Likert-Skalen-Format analysiert. Detailliert sind die Ergebnisse im Meilenstein-Dokument 5 beschrieben. Im Überblick lässt sich sagen, dass die Ergebnisse der finalen Umfrage sehr ähnlich zu den Ergebnissen der Pilotstudie ausfielen, die ebenfalls bereits viele der Likert-Skalen-Fragen beinhaltete. Eine interessante Änderung der Ergebnisse aus der Likert-Skalen-Befragung ergibt sich hinsichtlich der Aussage: „Ich bevorzuge Heiztechnologien, die bereits ausgereift sind und sich bewährt haben, gegenüber neueren und innovativeren Technologien.“ Dieser Aussage stimmten zwar im Februar 2022 71% der Befragten zu, allerdings deutlich weniger als noch im Herbst 2020 im Rahmen der Pilotstudie. Eine mögliche Interpretation für diese Beobachtung ist, dass sich ein Wandel der Präferenzen vollzieht und die Bereitschaft zur Investition in neue und innovative, aber damit auch weniger ausgereifte Heiztechnologien steigt.

Neben den in Tabelle 2 gezeigten Ergebnissen für die gesamte Stichprobe, wurden Analysen für ausgewählte soziodemographische Gruppen vorgenommen. Diese wurden dabei gezielt nach den in den Diffusionsmodellen hinterlegten Gruppen ausgewählt. Letztendlich fand eine Differenzierung nach Geschlecht, Stadt-Land, Eigentümer-Mieter, Nettohaushaltseinkommen, Alter und Bildungshintergrund statt. Soweit vor dem Hintergrund der Stichprobengröße möglich, wurden diese Faktoren auch weiter interagiert (Bspw. Alter_Geschlecht). Eine detaillierte Beschreibung der Ergebnisse der einzelnen soziodemographischen Gruppen ist im Meilenstein-Dokument 5 enthalten.

Die Präferenzen in Form von relativen Gewichtungsfaktoren und Zahlungsbereitschaften wurden an die Diffusionsmodelle übergeben. Sie ermöglichen die Berücksichtigung von Präferenzen für monetären und nicht-monetären Attributen von Heizungstechnologien bei der Wahl durch Entscheider:innen und wirken sich damit auf die Entwicklung der Marktanteile in den betrachteten Szenarien aus (vgl. Kapitel 4.2.2).

Abschließend gebietet es darauf hinzuweisen, dass innerhalb der Projektlaufzeit starke Verwerfungen an den Energiemärkten und auf geopolitischer Ebene stattfanden, die mit hoher Wahrscheinlichkeit auch Einfluss auf die tatsächlichen Zahlungsbereitschaften für Attribute von Heiztechnologien haben. Für die Einordnung und Interpretation der Ergebnisse ist daher entscheidend zu berücksichtigen, dass die finale Umfrage im Februar 2022 durchgeführt wurde. Zu diesem Zeitpunkt waren die Energieträgerpreise in Europa bereits auf einem deutlich erhöhten Niveau, der genaue Zeitpunkt lag jedoch vor dem Beginn des Krieges in der Ukraine.

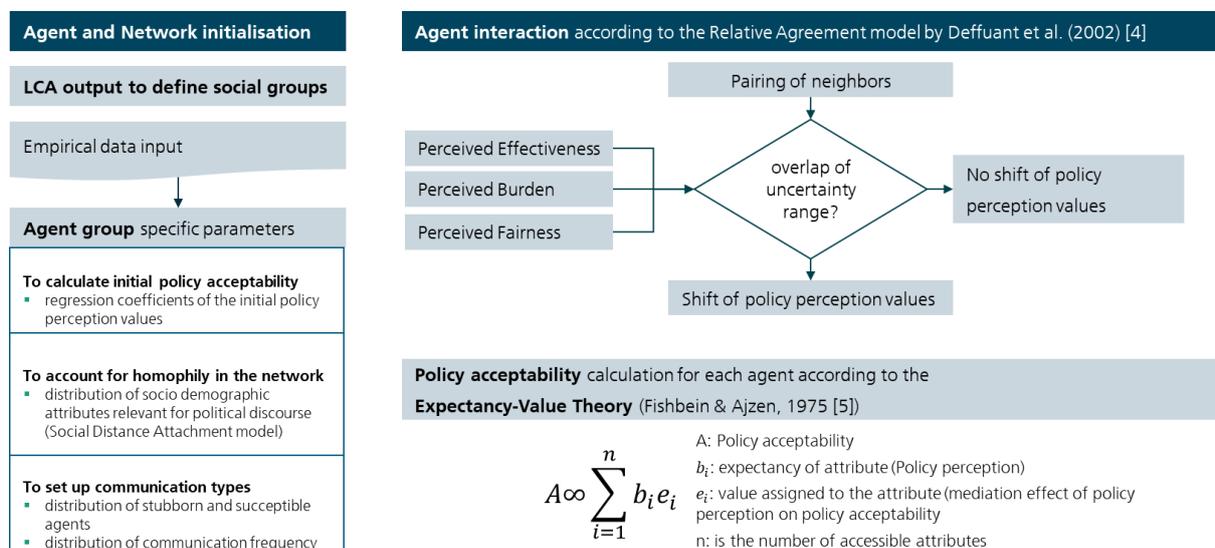
5.3 Empirischer Input für das Modell sozio-politischer Akzeptanz

Um die gesellschaftlichen Akteur:innen zu parametrisieren und zu initialisieren, stützt sich das agentenbasierte Modell PANDORA auf Daten, die durch eine empirische Studie im Rahmen von Manifold

gesammelt wurden. Die Studie wurde als Vignetten-Experiment⁵ konzipiert und als Online-Umfrage im Jahr 2020 durchgeführt. Die Teilnehmenden bewerteten mehrere Vignetten, die eine auf den Heizungssektor abzielende Politikmaßnahme darstellten. Der Inhalt der Vignette variierte, um den Einfluss dieser Variationen auf die Bewertungen der Befragten zu bestimmen. Die Teilnehmenden hatten die Aufgabe zu bewerten, ob sie die Politikmaßnahme als fair, wirksam und / oder finanziell belastend empfanden und ob sie die Politikmaßnahme akzeptieren würden. Darüber hinaus wurden soziodemografische Daten der Teilnehmenden erhoben.

Die Auswertung der Daten erfolgte in drei Schritten. Im ersten Schritt wurde eine Mediationsanalyse durchgeführt, um zu testen, ob die individuelle Wahrnehmung einer Politikmaßnahme als Mediator für die Akzeptanz dieser Politikmaßnahme fungiert. Im zweiten Schritt wurde eine Multi-Level Analyse durchgeführt. Diese regressionsanalytische Methode wurde verwendet, um hierarchisch strukturierte Daten zu evaluieren und zu bestimmen, welche Faktoren signifikant sind und wie sich soziopsychologische Faktoren in Bezug auf die Ausprägungen der Vignette verhalten. Der dritte Schritt beinhaltete die Anwendung einer Latent Class Analysis (LCA). Diese statistische Methode wurde verwendet, um Klassen auf der Grundlage von Ähnlichkeiten in den Antworten der Befragten zu identifizieren. Details zum Studiendesign und Auswertung der Ergebnisse befinden sich im Meilenstein-Dokument 5 (im Anhang A1.4). Dieser methodische Ansatz ermöglichte es, die Daten für die Integration in das Modell vorzubereiten. Einen Überblick über das Zusammenwirken der Modellkomponenten gibt Abbildung 3.

Abbildung 3: PANDORA - Überblick über Interaktion der Modellkomponenten



⁵ Ein Vignetten-Experiment ist eine Forschungsmethode, bei der Teilnehmenden kurze Beschreibungen hypothetischer Situationen oder Szenarien – sogenannte Vignetten – vorgelegt werden. Diese Szenarien sind so gestaltet, dass sie bestimmte Variablen variieren, um die Auswirkungen dieser Veränderungen auf die Reaktionen oder Entscheidungen der Teilnehmer zu untersuchen. Die Methode wird häufig verwendet, um Einstellungen und Wahrnehmungen in kontrollierten Kontexten zu erforschen.

6 Interdisziplinäre Entwicklung und Evaluation von Politikinstrumenten

Die in Kapitel 4 dargestellten Modellkopplungen bzw. Modellerweiterungen wurden hier für einen ausgewählten Technologiebereich umgesetzt. Als Bebielsektor wird der Wärmebereich gewählt, da dieser in allen beteiligten Energiesystemmodellen ausreichend abbildbar ist und zudem auf Erkenntnisse auf Vorläufer-Projekte (z.B. DiffusionEE, SozioE2S) aufgebaut werden kann. Zudem bietet dieser aufgrund der Heterogenität der Akteure und der Kleinteiligkeit der Investitionsentscheidung besondere Herausforderungen hinsichtlich der Überwindung individueller und kollektiver Hemmnisse. Der Fokus in diesem Kapitel liegt auf der interdisziplinären Entwicklung und Evaluation von Politikinstrumenten in Energieszenarien auf Basis der veränderten Modellwelt. Ziel war es dabei, insbesondere akteurspezifische Maßnahmen abzubilden, die bisher in Energiesystemmodellen nur unzureichend berücksichtigt werden konnten. So wurden insbesondere durch die Entwicklung des Akteursmodells PANDORA beispielsweise die Bewertung flankierender Maßnahmen zur Erhöhung der Akzeptanz bestimmter Technologien auf Grundlage empirischer sozialwissenschaftlicher Ergebnisse ermöglicht. Auch Maßnahmen, die auf die Interaktion zwischen Akteuren abzielen oder auf die Diffusion im Nachfragebereich durch die Adressierung von Change Agents / Intermediären wurden quantitativ bewertet. Des Weiteren konnten klassische Politikbündel, die ordnungsrechtliche Vorgaben, finanzielle Förderungen oder preisbasierte Instrumente beinhalten, durch die Kopplung der Modelle umfassender bewertet werden. Mit dem neu entwickelten Modellinstrumentarium können auch endogen sekundäre Wirkungen modelliert werden, wie z.B. die Auswirkung auf die Innovationsfähigkeit und die Akzeptanz von Politikbündeln.

6.1 Szenariendefinition

Im Rahmen des Projektes wurden vier Szenarien - ein Referenzszenario und drei Politiksznarien - mit dem Modellverbund modelliert. Der Szenarienzeitraum erstreckt sich von 2020 bis 2045, mit 2045 als Zieljahr für die Erreichung der Klimaneutralität in Deutschland. Alle Szenarien berücksichtigen empirische Daten, deren Modellintegration und methodische Modellerweiterungen, die im Rahmen des Forschungsvorhabens erarbeitet wurden.

Dabei sollten die drei Zielszenarien einem ambitionierten Pfad folgen und Politikmaßnahmen beinhalten, die über die Maßnahmen des Referenzszenarios hinausgehen. Der Fokus aller drei Szenarien lag insbesondere auf dem politischen Handlungsbedarf zur Erreichung des THG-Budgets bis 2045 sowie der Klimaneutralität des Gebäudebestands bis 2045. Dabei wurden drei verschiedene Pfade unterschieden, die auf unterschiedlichen Ebenen ansetzen und somit unterschiedliche politische Maßnahmen beinhalten. Neben einem Zielszenario, in dem eine technologieoffene Strategie zur Erreichung der Klimaziele unterstellt wird, wurden zwei unterschiedliche kostenoptimale Pfade definiert, die insbesondere auf Wärmepumpen und Wärmenetze fokussieren. Tabelle 3 gibt einen Überblick über die drei Szenarien.

Im **Szenario Technologieoffenheit** wurde untersucht, welche Konsequenzen der technologieoffene Pfad für die Zielerreichung hat. Der technologieoffene Ansatz ging dabei davon aus, dass die Ziele auch durch die Dekarbonisierung von Energieträgern im Gebäudesektor erreicht werden können, die heute teilweise noch nicht zur Verfügung stehen. Die Hypothese für dieses Szenario war, dass dies wahrscheinlich zu höheren Gesamtsystemkosten führt als in einem Szenario, in dem die Technologiewahl bereits durch einen kostenoptimalen Pfad stärker gesteuert wird. Gleichzeitig wurde hier die Hypothese überprüft, ob dieses Szenario zum jetzigen Zeitpunkt zu einer höheren gesellschaftlichen Akzeptanz führt als die anderen Szenarien, da es zum jetzigen Zeitpunkt weniger

Veränderungen und Transformationsdruck für den Gebäudesektor und damit für die privaten Haushalte erfordert.

Im Gegensatz zur Technologieoffenheit des ersten Szenarios wurde in den **Szenarien Transformation entlang eines kostenoptimalen Pfades** ein stärkerer Fokus auf die Förderung der Verbreitung von Wärmepumpen und den Ausbau von Wärmenetzen gelegt. Die Szenarien wurden so konzipiert, dass die Technologiewahl durch ein verändertes Politikdesign und zusätzliche Instrumente in Richtung des angestrebten kostenoptimalen Technologiepfades gelenkt wird. Für beide Szenarien ist die Analyse und Bewertung der gesellschaftlichen Akzeptanz von Interesse. Die untersuchte Hypothese ist hier, dass die gesellschaftliche Akzeptanz im Vergleich zu Szenario 1 geringer ausfällt. Die kostenoptimalen Pfade gehen davon aus, dass zur Erreichung der Ziele 2045 bereits heute eine hohe Transformationsgeschwindigkeit im Gebäudesektor notwendig ist. Diese kann nur durch ambitionierte Politikmaßnahmen erreicht werden, die Anreize zum frühzeitigen Handeln setzen. Insbesondere restriktive „Push-Politiken“ können auf gesellschaftliche Ablehnung stoßen.“

Tabelle 3: Annahme von drei politischen Szenarien für den Bereich Wärme

Szenario	Technologieoffenheit	Transformation zu kostenoptimalen Pfad Policy-Package 1	Transformation zu kostenoptimalen Pfad Policy-Package 2
Beschreibung	Technologieoffene Adressierung mit der Hypothese, dass Technologien, die heute fossile Energieträger nutzen, später dekarbonisiert werden können.	Fokus insbesondere auf Wärmepumpen und Wärmenetze. Starke Förderung von Innovationssystemen	Fokus insbesondere auf Wärmepumpen und Wärmenetze Starke Förderung von Nachfrageseite
Hypothese	Höhere Akzeptanz, da heute weniger Veränderung stattfindet In Zukunft wären höhere Kosten zu erwarten	Geringere Akzeptanz → Transformationsgeschwindigkeit im Gebäudesektor notwendig	Geringere Akzeptanz → Transformationsgeschwindigkeit im Gebäudesektor notwendig
Erreichung Budget bis 2045	✓	✓	✓
Erreichung 2045 Ziele	✓	✓	✓ 1
Erreichung 2030 Ziele		✓	
Fokus Innovationssystem		✓	

Szenario		Technologieoffenheit	Transformation zu kostenoptimalen Pfad Policy-Package 1	Transformation zu kostenoptimalen Pfad Policy-Package 2
Fokus Akzeptanz		Hohe Akzeptanz	Niedrigere Akzeptanz im Vergleich zu PP2 – Abhängig von der Art der Politikmaßnahmen	Höhere Akzeptanz im Vergleich zu PP1
Fokus Energiesystemkosten		✓	✓ ₂	
Fokus Fachkräfte			✓	
		Technologieoffen aber mit welchen Konsequenzen		"Klimaschutz jetzt"

7 Ergebnisse der Modellierung

Dieses Unterkapitel liefert einen kurzen Einblick in die zentralen Ergebnisse der Szenarien Modellierung. Die detaillierten Ergebnisse aller Szenarien sind im Meilenstein-Dokument 7 (Anhang A.1.6) dokumentiert.

7.1 Technologiegenese- und Lernkurvenmodellierung

Zu den wichtigsten Erkenntnissen aus den Modellsimulationen gehören:

- **Lernkurven - stabilisierende Funktion von Systeminvestitionen:** Technologiediffusionsoptionen durch spezielle F&E-Programme & technologiespezifische Anreiz- und Subventionssysteme führen nicht zwangsläufig zu einer besseren Leistung bestimmter Produkte innerhalb des Innovationssystems. Stattdessen scheint der Haupteffekt darin zu bestehen, potenzielle Störungen in der Versorgungskette zu stabilisieren oder Ungleichgewichte in der Gesamtdynamik zwischen Angebot und Nachfrage abzufedern.
- **Anzahl der Installateur:innen - Wirksamkeit der öffentlichen Politik:** Obwohl Investitionen in die Aus- und Weiterbildung von Installateur:innen einen direkten Einfluss auf die Verfügbarkeit und das Wachstum von Installationskapazitäten für bestimmte Heiztechnologien haben, überbrücken die Investitionen nicht sofort die Lücke zwischen der bestehenden Diskrepanz zwischen der Technologienachfrage und der begrenzten Installationskapazität. Dies scheint vor allem auf die Zeitintensität von Lern- und Ausbildungsprogrammen sowie auf den allgemein langen Lebenszyklus von Heiztechnologien zurückzuführen zu sein. In Situationen, in denen eine bestimmte Produktnachfrage nicht befriedigt werden kann und stattdessen eine alternative Lösung zum Einsatz kommt, könnte die Dynamik der Nachfrage nach bestimmten Produkten nachlassen.

Abbildung 4: Lernkurven für alle Technologien. X-Achse: Zeitschritte; Y-Achse: Durchschnittliche Gesamtkosten (€)

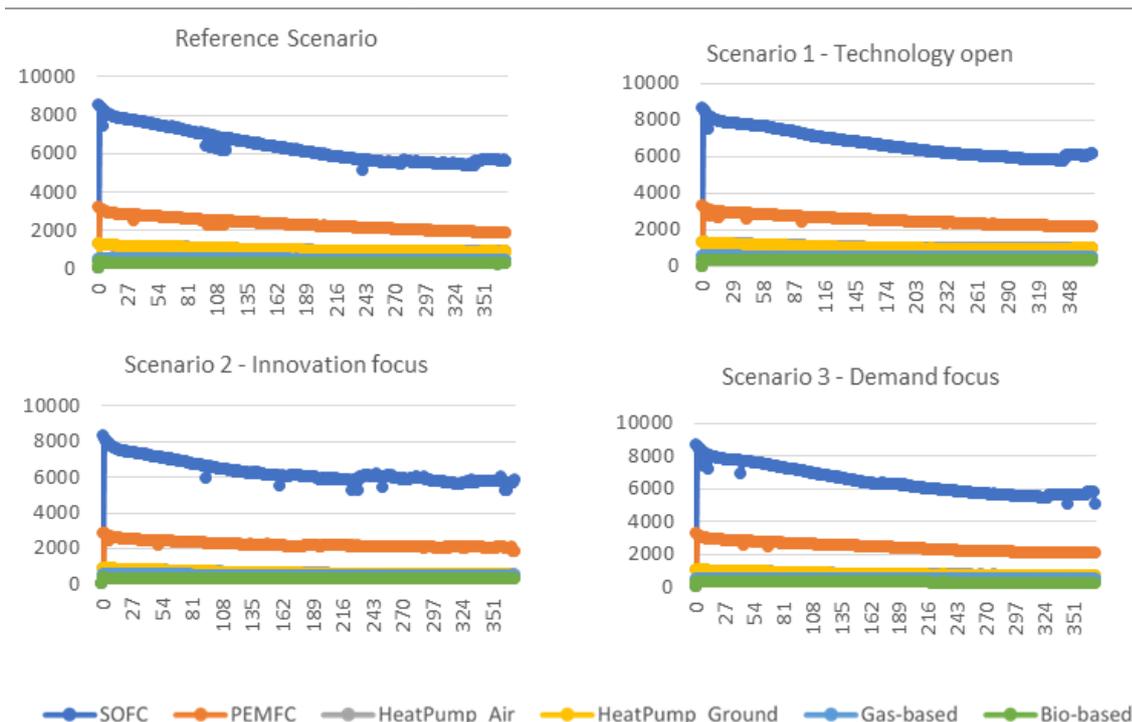
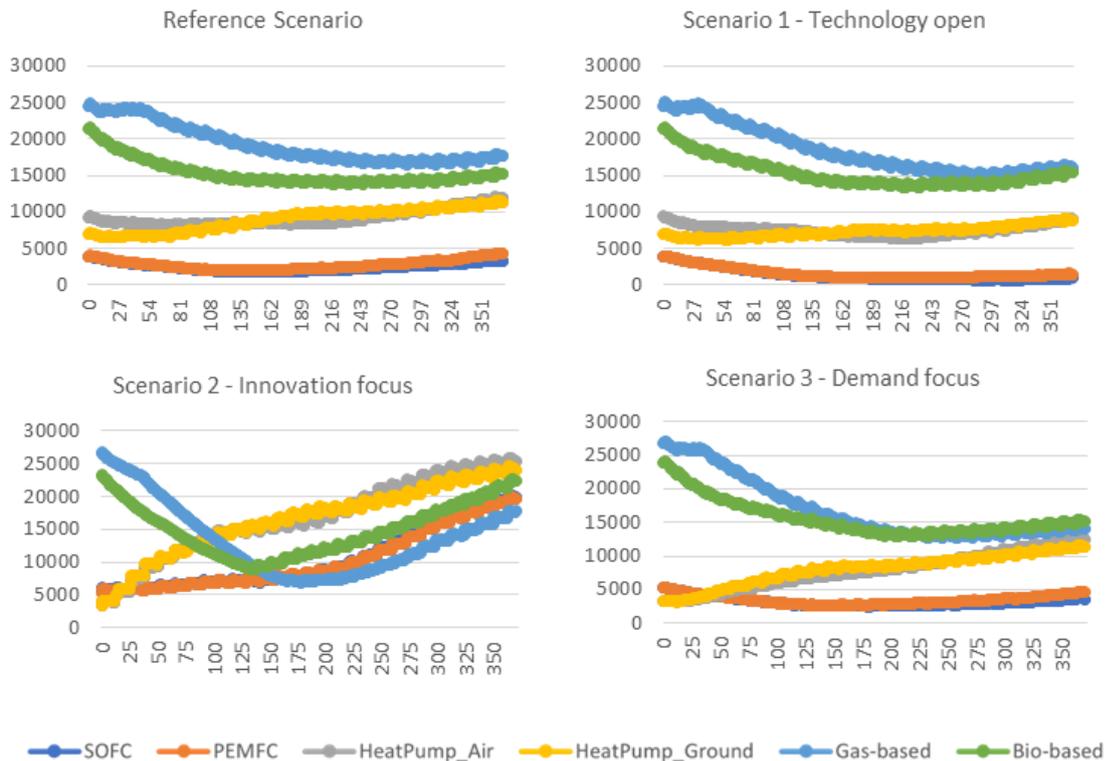


Abbildung 5: Aggregierte Gesamtinstallationskapazität der Installateure für verschiedene Heiztechnologien, basierend auf der verfügbaren Kapazität, die dem Produktportfolio der einzelnen Installateure zugeordnet ist. X-Achse: Zeitschritte; Y-Achse: Gesamtkapazität



Insgesamt haben die Ergebnisse der Szenarioläufe zu einem allgemein verbesserten Verständnis der Systemdynamik, der Interaktionen zwischen den Akteuren sowie der damit verbundenen Mechanismen des Wissensaustauschs, geführt. Darüber hinaus erwies sich die Kopplung von Modellen als vorteilhaft. Unter anderem wurde Folgendes ermöglicht:

- Dezentraler Ansatz zur Modellentwicklung und Kombination verschiedener spezialisierter Modelle
- Multi-Akteurs- und multi-Ebenen-Ansatz
- Indirekte Zusammenführung eines großen und vielfältigen Datensatzes für die Modellkalibrierung/-validierung

Obwohl die Operationalisierung der konzeptualisierten Modell-Kopplung im Allgemeinen gut umgesetzt wurde, gab es auch einige Herausforderungen während des Prozesses. Einige der wichtigsten Herausforderungen waren:

- Zeitverschiebung: Da die tatsächliche Zeitverzögerung in Bezug auf die Modelllaufzeit oft länger war als ursprünglich geplant, war die Anzahl der Modell-Feedback-Iterationen begrenzt. Künftige Forschungsarbeiten könnten sich daher darauf konzentrieren, die Anzahl der Feedback-Iterationen zu ermitteln, die erforderlich sind, um legitime Schlussfolgerungen innerhalb von Simulationsmodellen und über Simulationsmodelle hinweg zu ziehen, sowie Zeitprobleme bei der Ausführung von Modellläufen innerhalb der Gesamtarchitektur strukturell anzugehen

bzw. Möglichkeiten einer direkteren Kopplung der Modelle zu untersuchen und, wo möglich, umzusetzen.

- Differenzierung: Obwohl die meisten Schlüsselvariablen konzeptionell in den verschiedenen Modellen innerhalb der Modellierungsarchitektur vorhanden waren, führten Unterschiede in ihrer Differenzierung manchmal zu Problemen bei der Harmonisierung von In-silico-Daten. Infolgedessen waren manchmal verschiedene qualitative Annahmen oder Dateninterpolationen erforderlich, um einige der Output-Input-Modellschnittstellen zu operationalisieren. Künftige Forschungsarbeiten könnten sich auf die Frage konzentrieren, wie miteinander verbundene Modelle so gestaltet werden können, dass die Differenzierung identifizierter oder definierter Schlüsselvariablen zwischen den Modellen innerhalb der Gesamtarchitektur harmonisiert werden kann.
- Ausmaß der Modell-Integration: Obwohl die Vielzahl der Modelle innerhalb der gesamten Modellarchitektur zu einer reichhaltigen Abbildung des analysierten Energiesystems geführt hat, hat ihre Vielfalt - insbesondere im Hinblick auf den Modellfokus und die damit verbundene Analyseebene - auch dazu geführt, dass einige der konzipierten Modellschnittstellen nicht für die Übersetzung in eine Output-Input-Modellschnittstelle geeignet sind. Da dies zum Teil auch durch die verfügbare Datenbasis bedingt ist, könnte sich die zukünftige Forschung darauf konzentrieren, inwieweit die Möglichkeit der Modellkopplung durch die Art der Datenerhebung und -analyse innerhalb und über die Modellentwicklung hinweg beeinflusst wird und wie sie verbesserte werden kann.

Ausgehend von den erzielten Ergebnissen und den daraus gezogenen Lehren ergeben sich für die weitere Forschung unter anderem folgende Möglichkeiten:

- Die Weiterentwicklung von Schnittstellen zwischen Makro- und Mikroebene; d.h. Modellierung verschiedener (Teil-)Bereiche von Energiesystemen
- Das Modell-technische Matchen unterschiedlicher Zeithorizonte; d.h. Simulationsschritte von Sekunden/Minuten vs. Monaten/Jahren
- Die Harmonisierung von modell-übergreifenden Konzepten; z.B. wie gehen verschiedene Modelle mit (unterschiedlichen Formen des) Lernens um
- Integrierte Zusammenführung von analytischer starker Konzentration der Ergebnisse einzelner Modelle, um die Formulierung aggregierter Empfehlungen besser konkretisieren zu können.

Die Ergebnisse der Simulationen zeigen insgesamt, dass es für die Formulierung effektiver Politikmaßnahmen wichtig ist, Wirkungen auf verschiedenen Ebenen von Fördersystemen, inklusive Aus- und Weiterbildungsgestaltung, zu untersuchen. Nicht ausreichende Kopplungen der Simulationen zeigten Gefahren unabgestimmter Fördersysteme. Ungewollt können diese indirekt zu Förderungen anderer, bereits etablierter, Technologien oder zu Hemmnissen für andere gewünschte Technologien führen. Auch können falsch eingesetzte Standards, z.B. für die Ausbildung, zu ineffizienten Kosten-Nutzenverhältnissen im Fördersystem bzw. zu Überförderungen führen (s. auch Fazit im Meilenstein-Dokument 6 - Anhang A1.5). Die im Projekt erarbeiteten Modelle ermöglichen die Analyse von Politiken, die auf verschiedenen Ebenen gleichzeitig ansetzen. Um ein konsistentes Gesamtbild zu ermitteln sind allerdings weitere, dynamischere Kopplungen oder bessere Teilabbildungen des Modellverhaltens der jeweils anderen Modelle sinnvoll, die weitere Arbeiten an und mit den Modellen erfordern.

7.2 Diffusionsmodelle

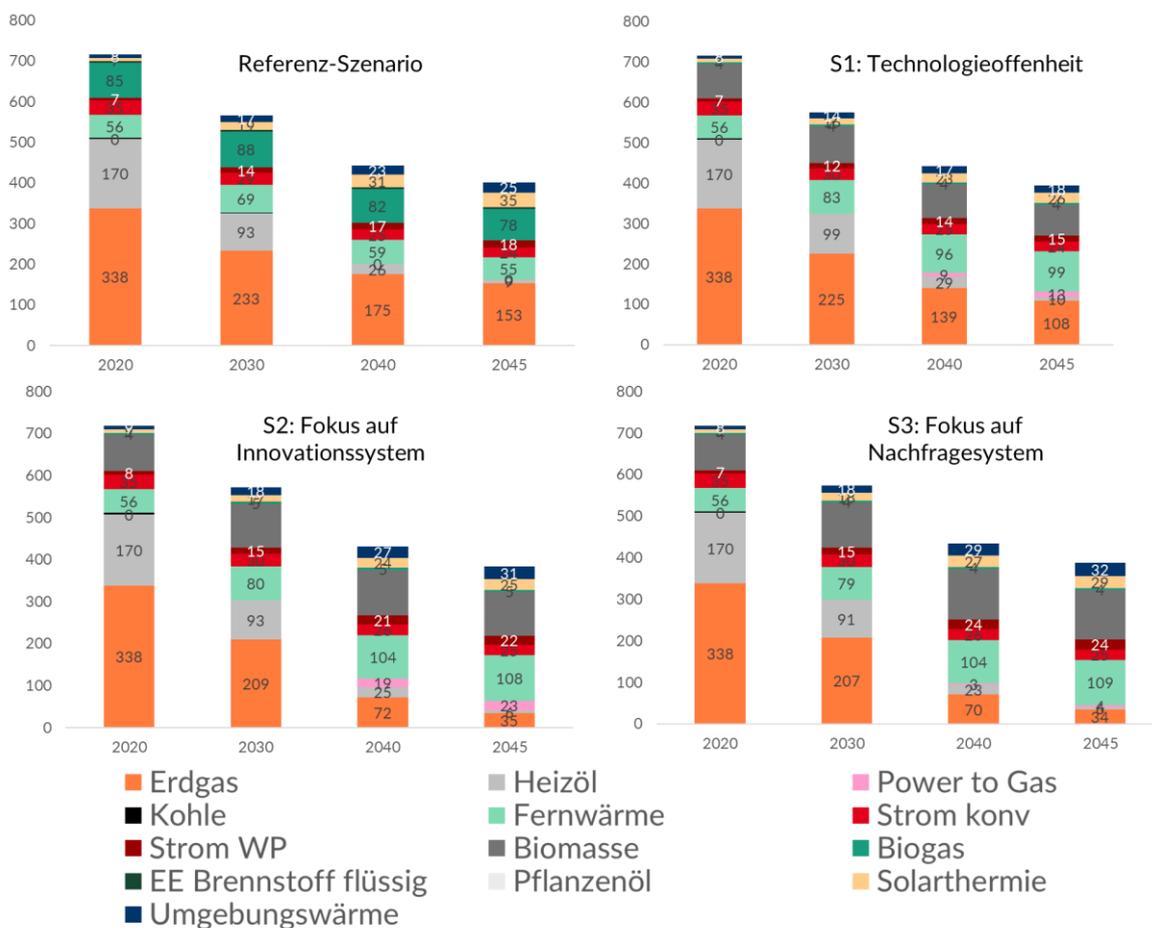
Invert/ee-lab

Abbildung 6 zeigt die Ergebnisse mit Bezug auf die Entwicklung des Endenergiebedarfs des gesamten Gebäudesektors in den modellierten Szenarien. Da die Politikinstrumente für Effizienzmaßnahmen im Gebäudesektor in allen Szenarien gleichgeblieben sind, ist der Rückgang des Endenergiebedarfs in den Szenarien auf ähnlichem Niveau, wobei sich aufgrund der Technologiewahl deutliche Unterschiede in der Entwicklung der eingesetzten Energieträger ergeben. Die Unterschiede beim Endenergiebedarf sind auf unterschiedliche Effizienzen der eingesetzten Wärmeversorgungssysteme zurückzuführen sowie auch zu geringem Anteil auf die Rückkopplung zu der Investitionsentscheidung in Effizienzmaßnahmen durch die eingesetzten Wärmeversorgungssysteme. Die Investitionsentscheidung in Effizienzmaßnahmen wird jedoch nicht mit dem Manifold-Ansatz durch Modellkopplung modelliert.

Die Unterschiede zwischen den Szenarien resultieren somit maßgeblich aus der Wahl der Wärmeversorgungssysteme über den Simulationszeitraum und der daraus resultierenden Pfade:

- Der Endenergieverbrauch für Raumwärme und Warmwasser im Gebäudesektor reduziert sich in den Szenarien im Zeitraum von 2020 bis 2045 um 44 % im Referenzszenario, in den Politikszenerarien ist die Reduktion etwas höher und liegt bei 45 bis 46 %.
- Beim Einsatz fossiler Energieträger wird der Einsatz von Heizöl in allen Szenarien bis 2045 fast komplett reduziert. Der Unterschied zwischen Referenz- und Zielszenarien ist mit Bezug auf die in den Gebäuden verbliebenen Technologien nicht signifikant, da Installationsverbot für neue Heizölheizungen bereits im Referenzszenario berücksichtigt wird. Der verbliebene Heizölbedarf wird in den Zielszenarien durch flüssige erneuerbare Brennstoffe (biogen oder synthetisch) ersetzt, was in der gesamtsystemischen Szenarienmodellierung untersucht wird. Ein signifikanter Unterschied zwischen den Szenarien zeigt sich im Entwicklungspfad für Gas und dessen Ersatz durch biogene und synthetische erneuerbare Brennstoffe.
- Im Referenzszenario wird der Einsatz von Erdgas bis 2030 um 31 % reduziert und bis 2045 um 54 %. Während im Szenario Technologieoffenheit der Einsatz von Erdgas bis 2045 mit der Aussicht auf eine Dekarbonisierung durch Power-to-Gas weniger restriktiv eingegrenzt wird, wird dieser in den Szenarien S2 und S3 stärker restriktiv behandelt. Auch der Fokus der Förderung im Innovationssystem und der Weiterbildung von Installateuren ist im Szenario S2 stärker auf Wärmepumpen ausgerichtet. Während der Anteil von Erdgas an der Wärmeversorgung im Gebäudebereich im Jahr 2030 im Szenario S1- Technologieoffen noch bei 39 % liegt, ist dieser in den Szenarien S2 – Fokus Nachfrageseite und S3 – Fokus Innovationssystem bereits 37 % bzw. 36 % gesunken.
- Bis zum Jahr 2045 ist der Unterschied zwischen den Zielszenarien noch deutlicher. Im Szenario S1 – Technologieoffenheit hat die leitungsgebundene Gasversorgung (Power-to-gas, Biogas) noch einen Anteil von 31 % an der Wärmeversorgung. Im Szenario S2 beträgt diese 12,7% und im Szenario S3 11 %.

Abbildung 6: Entwicklung des Endenergieverbrauchs im Gebäudesektor und im Manifoldbereich im Referenzszenario



Für den Vergleich zwischen dem Szenario Technologieoffenheit und den „Fokus-Szenarien“ (S2, S3) ist zu erwähnen, dass die Investitionsentscheidung der im Modell hinterlegten Agenten mit dem Wissenstand zu dem jeweiligen Zeitpunkt erfolgt. Das heißt höhere Energiepreise für die Dekarbonisierung von Erdgas durch Power-to-Gas werden zum Zeitpunkt der Entscheidung in einen Gaskessel nicht bzw. nicht vollumfänglich einbezogen. Der Preisimpuls kommt erst mit einer Quote für synthetisches erneuerbares Gas ab 2030, die sukzessive ansteigt. Diese wirkt sich jedoch dann nur auf die zukünftigen Wärmeversorgungswechsel aus, nicht auf die bereits getätigten Investitionen. D.h. die Ergebnisse der Szenarien lassen für sich genommen keinen Rückschluss auf einen systemisch optimalen Pfad, sondern zeigen Pfade auf, die sich aufgrund der Entscheidungskalküle, der jeweiligen politischen Rahmenbedingungen sowie der Entwicklung des Marktes und des Innovationssystems für einzelne Technologien ergeben. Eine Beurteilung der Pfade ist erst durch die Integration der Ergebnisse in die gesamtsystemische Modellierung mit Remod und Enertile möglich. Eine detaillierte Darstellung der Szenariendefinition und der Ergebnisse ist im Meilenstein MS7 zu finden.

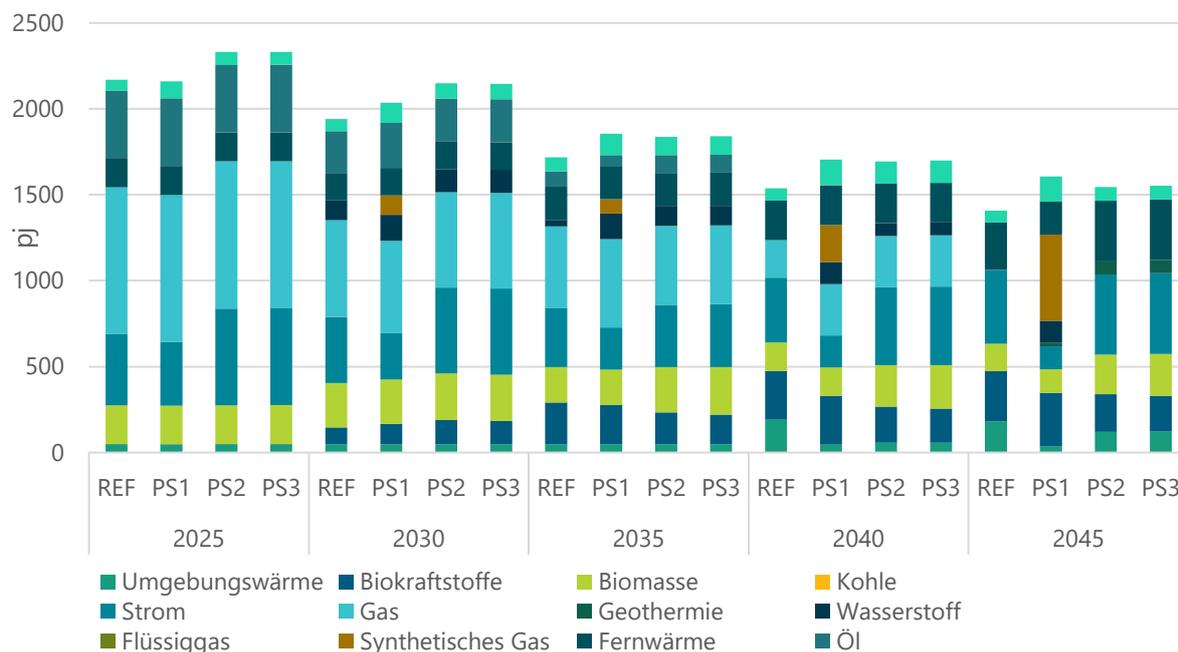
TAM-HHs

TAM-HHs kann angewendet werden, um die Auswirkungen politischer Maßnahmen auf verschiedene sozioökonomische Merkmale der Haushalte sowie die bebaute Umgebung zu bewerten und besser zu verstehen (Dobbins und Fahl 2023). Die in dieser Studie durchgeführte Analyse integrierte sozioökonomische Erkenntnisse zu Präferenzen wie der Zahlungsbereitschaft (mittels DCE) sowie den Auswirkungen technologischer Innovationen und Entwicklungen auf Investitionskosten (im

Modell SLICK). Diese methodischen Ergänzungen führten zu einer Analyse der Auswirkungen auf die Arten von Investitionen, die aufgrund spezifischer Einschränkungen wie dem Zugang zu Ressourcen, Netzen oder Technologien sowie der Fähigkeit, sich Investitionen zu leisten, welche im Haushaltssektor getätigt werden können. Zusammen mit dem übergreifenden Rahmen, der politische Entscheidungen und Maßnahmen vorantreibt, wie z. B. der Notwendigkeit einer Dekarbonisierung bis 2045, können diese Ergebnisse die Arten von Maßnahmen (z. B. Förderung, Verbote, Anreize) unterstützen und die auf bestimmte Haushaltstypen zuschneiden (z. B. nach Einkommen, Gebäudetype, Urbanisierung).

Aufgrund der hohen Disaggregation der Akteure in der Modellierung des Haushaltssektors mit den verbundenen Energieeinsätzen und Emissionen ermöglicht TAM-HH Einblicke in die Auswirkungen von Richtlinien, Innovationen in der Technologieentwicklung oder Nachfragemerkmalen, die anhand verschiedener sozioökonomischer Parameter analysiert werden können, die zur Charakterisierung des Haushaltssektors herangezogen werden. Im folgenden Abschnitt werden die Transformationspfade für Haushalte anhand dieser verschiedenen sozioökonomischen Parameter beschrieben, um die daraus gewonnenen Erkenntnisse für den gesamten Endenergieverbrauch, die Entwicklung der Treibhausgasemissionen, die Verteilung energetischer Sanierungen, die Installationsraten von Wärmepumpen und die Verteilung der Fernwärme hervorzuheben, die jeweils anhand einer anderen Charakteristik analysiert werden.

Abbildung 7 zeigt die Entwicklung des Endenergieverbrauchs im Haushaltssektor nach Szenario von 2025 bis 2045. Die Gesamtentwicklung in den drei Politikszenerarien variiert in gewissem Maße, insbesondere hinsichtlich der Dekarbonisierungsrate und des Verzichts auf Öl und Gas. Insbesondere das Szenario Technologieoffenheit (PS1) integriert in 2045 einen größeren Anteil an synthetischem Gas und Wasserstoff (der in den anderen Szenarien nicht verfügbar ist), um größere Anteile von Fernwärme und Umgebungswärmepumpen sowie den damit verbundenen Strom zu ersetzen. Aufgrund der Berücksichtigung von Budgetbeschränkungen im Modell kommt Wasserstoff ab 2030 in allen Szenarien zum Einsatz. Die Budgetbeschränkungen begrenzen das Gesamtkapital, das den verschiedenen Haushaltstypen zur Verfügung steht, und bis 2030 haben die Haushalte noch nicht genügend Kapital angespart, um die hohen Vorlaufkosten der Investitionen zu tragen, und bevorzugen daher eher alternative netzbasierte Lösungen, wie z. B. die Integration dekarbonisierter Brennstoffe in das Gasnetz. Die Nutzung des bezüglich der Brennstoffkosten teureren Wasserstoffs wird in späteren Jahren schrittweise eingestellt, da die Haushalte dann genügend Mittel für eine alternative Investition ansammeln konnten. Das Referenzszenario integriert den größten Anteil an Umgebungswärmepumpen im Jahr 2045, während in den Szenarien "Policy Package 1 - Innovation" (PS2) und "Policy Package 2 - Nachfrage" (PS3) Erdwärmepumpen bevorzugt werden.

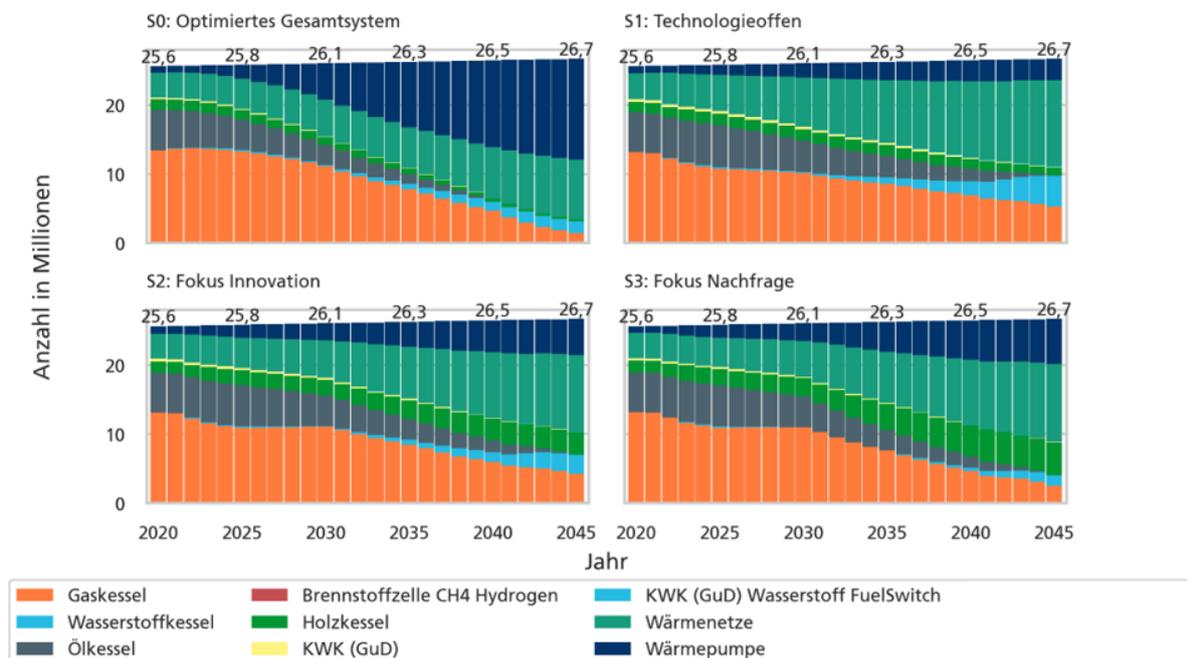
Abbildung 7: Entwicklung des Endenergieverbrauchs der Haushalte nach Szenario

Die in das Energiesystem integrierten Arten von Brennstoffen und Sekundärenergieträgern zielen alle auf die Dekarbonisierung ab, beziehen aber die finanziellen und infrastrukturellen Beschränkungen des Haushaltssektors mit ein. Während die Szenarien Innovation (PS2) und Nachfrage (PS3) im Jahr 2045 weitgehend dekarbonisiert sind, weisen das Referenzszenario und das Szenario Technologieoffenheit (PS1) aufgrund der stärkeren Abhängigkeit von Bioenergieträgern immer noch einige Emissionen auf. Gesamtsystemische Modellierung

REMod

Insgesamt zeigt sich, dass sich durch die Berücksichtigung von politischen Maßnahmen und dem daraus resultierenden Akteursverhalten im Gebäudesektor eine deutliche Abweichung in der Transformation des Gesamtsystems ergibt. Es zeigt sich ein höherer Transformationsdruck, der sich im Rahmen der Modellierung beispielsweise dadurch lösen lässt, dass erneuerbare synthetische Gase sowie Biomassepotenziale erhöht werden. Während dies mathematisch einfach ist, stellt sich die Frage der Realisierbarkeit dieser Annahmen. Die Wasserstoffstrategie der Bundesregierung zielt darauf ab, bis 2030 10 GW Elektrolyseleistung in bereitzustellen. Zudem werden Wasserstoff Partnerschaften geschlossen, um benötigte Wasserstoffimporte decken zu können. Bereits im kostenoptimalen System ergibt sich ein erheblicher Transformationsbedarf. Diese Anforderungen werden jedoch durch eine Abweichung vom kostenoptimalen Transformationspfade im Gebäudesektor verstärkt. Der Vergleich eines optimalen Zielsystems zu den Politikenszenarien zeigt Abbildung 8.

Abbildung 8: Entwicklung des Heizsystembestands in den betrachteten Szenarien



Es ist fraglich, ob dieser zusätzliche Bedarf (an Biomasse und synthetischen erneuerbaren Energieträgern), der durch eine verzögerte Dekarbonisierung des Gebäudesektors und den weiteren Einsatz von gasbasierten Heizungssystemen entsteht, gedeckt werden kann. Dennoch ist festzuhalten, dass die Systeme abgesehen von unterschiedlichen Mengengerüsten keine drastischen Änderungen, im Sinne anderer Transformationspfade in den anderen Verbrauchs- und Umwandlungssektoren hervorrufen. Zu beachten sind jedoch folgende Aspekte: in der Tendenz gibt es Verlagerungseffekte hinsichtlich der Verwendung von Biomasse. In den Politiksznarien findet weniger Biomasse im Industriesektor Verwendung, da diese im Gebäudesektor nicht substituiert wird, wie es im kostenoptimalen Vergleichsszenario der Fall ist. Ein weiterer Aspekt ist, dass die Sanierungstiefe im Nachfrageszenario ein deutlich höheres Niveau aufweist, so dass der Passivhausstandard in 23% der Gebäude realisiert wird. Zudem besteht ein erheblicher Unterschied im Technologiemix des Gebäudesektors. Im kostenoptimalen Fall ist die Substitution von Gas- und Ölheizungen durch Wärmepumpen und Fernwärmeanschlüsse die beste Lösung. In den Politiksznarien hingegen nehmen Wärmepumpen eine weniger bedeutsame Rolle ein. Fernwärme hingegen muss deutlich ausgebaut werden.

Es kann also festgehalten werden, dass die Integration von Akteursverhalten und damit die implizite Berücksichtigung politischer Maßnahmen spannende neue wissenschaftliche Erkenntnisse und damit verbundene politische Implikationen generiert. Es konnte ebenfalls gezeigt werden, dass ein Abweichen vom kostenoptimalen Transformationspfad im Gebäudesektor direkt mit einem erhöhten Importbedarf synthetischer Energieträger in Verbindung steht und folglich die Abhängigkeit von Energieimporten steigen lässt. Ein weiterer Schritt wäre die Berücksichtigung des Akteursverhaltens auf die anderen Sektoren zu erweitern.

Enertile

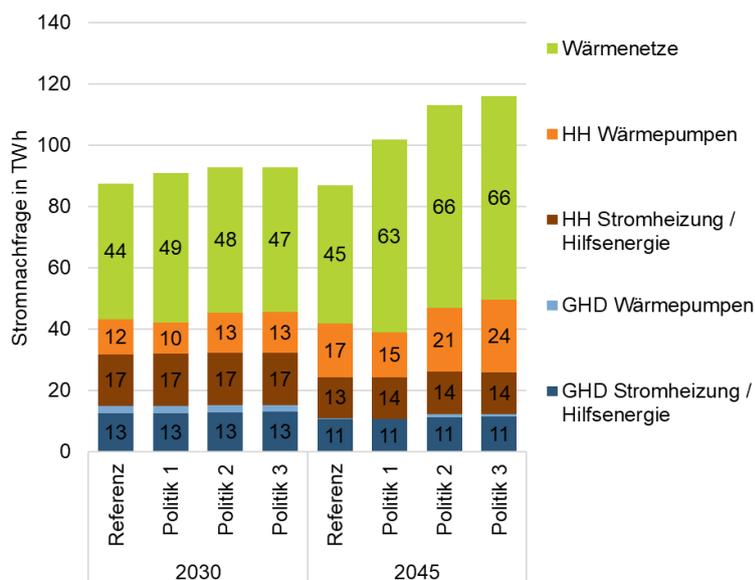
Die Auswertung der Szenarien in Enertile erfolgt mit Fokus auf die beiden politisch relevanten Jahre 2030 und 2045. Der analytische Schwerpunkt liegt auf Deutschland. Dennoch wurden auch alle

angrenzenden europäischen Regionen modelliert, da die Energiesysteme heute nicht mehr in einem ausschließlich nationalen Kontext angemessen betrachtet werden können.

Die Stromnachfrage kann in drei Kategorien eingeteilt werden. Erstens, die Stromnachfrage, die in allen Szenarien identisch ist und außerdem den größten Anteil an der Gesamtnachfrage hat. Diese umfasst die Stromnachfrage aus anderen Sektoren (Verkehr, Industrie, Sonstige in GHD und HH) und basiert auf den Daten des T45-Strom der Langfristszenarien⁶. Die zweite Kategorie umfasst die Stromnachfrage aus verschiedenen dezentralen Heizungsanwendungen, wie sie von INVERT modelliert wurden (siehe Abschnitt 7.2): elektrische Wärmepumpen und Stromheizungen bzw. Hilfsenergie in Haushalten und GHD. Diese Mengen variieren zwischen den Szenarien je nach Ausgestaltung des Szenariodesigns in INVERT. Die dritte Kategorie ist der Strombedarf für Elektrolyse und Wärmenetze innerhalb von Enertile. Zu dieser Kategorie gehören zentral installierte Elektrokesel und Großwärmepumpen für die Fernwärmeversorgung sowie der Strombedarf für die Wasserstoffproduktion (Elektrolyse), die innerhalb Deutschlands anfällt. Auch diese Mengen können zwischen den Szenarien variieren, da sie Bestandteil der Optimierung in Enertile sind.

Für einen besseren Überblick über die Unterschiede zwischen den Szenarien zeigt die Abbildung 9 nur die Stromnachfrage für die dezentrale und zentrale Wärmeerzeugung. Im Referenzszenario bleibt der Gesamtstrombedarf von rund 87 TWh konstant in beiden Jahren. Insgesamt fällt in den Politikenszenarien ein höherer Strombedarf zur Wärmeerzeugung an. Dieser liegt im Jahr 2045 mit etwa 100 bis 115 TWh höher als noch im Jahr 2030 mit rund 90 TWh. Der Strombedarf für Stromheizungen und Hilfsenergie ist für Haushalte und GHD in beiden Jahren vergleichsweise konstant über die vier verschiedenen Szenarien. Dabei fällt der Bedarf im Jahr 2045 etwas geringer aus als noch im Jahr 2030. Der Strombedarf der Wärmepumpen variiert zwischen den Szenarien vor allem im Haushaltssektor. Im Zeitverlauf nimmt in allen vier Szenarien der Strombedarf für Wärmepumpen in Haushalten zu. Weiterhin steigt der Strombedarf für die zentrale Wärmebereitstellung in Fernwärmenetzen zum Teil deutlich an. Die strombasierten Wärmetechnologien stellen jedoch nur einen Teil der möglichen Versorgungsoptionen in Fernwärmenetzen dar.

Abbildung 9: Entwicklung der Stromnachfrage für die Wärmeerzeugung in Deutschland



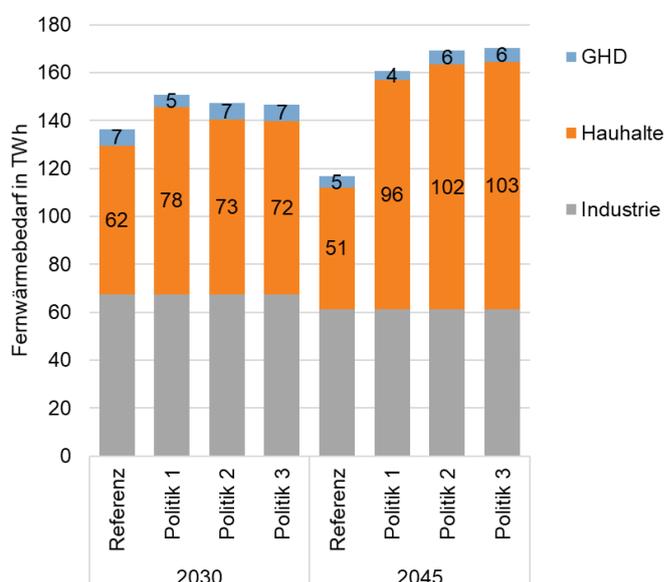
Quelle: Fraunhofer ISI

⁶ Die entsprechenden Szenariendaten sind stets aktuell auf der Website der Langfristszenarien einzusehen: [Gesamtbilanzen](#) | [Langfristszenarien](#)

Abbildung 10 zeigt die Entwicklung des gesamten Fernwärmebedarfs in Deutschland für die vier Szenarien. Dieser Bedarf fällt in drei Nachfragesektoren an: Industrie, Haushalte und GHD. Der Fernwärmebedarf der Industrie ist in allen Szenarien konstant und entstammt dem Szenario T45-Strom der Langfristszenarien. Die Fernwärmebedarfe für Haushalte und GHD werden im Modell INVERT ermittelt und variieren je nach Szenariodesign. Der Anteil der Haushalte nimmt einen großen Anteil des Gesamtbedarfs ein und somit zeigt sich hier eine etwas größere Spreizung zwischen den verschiedenen Szenarien in Manifold.

Für den Bereich GHD sind nur geringfügige Änderungen zwischen den Szenarien und Jahren erkennbar. Der Gesamtbedarf variiert zwischen 4 und 7 TWh. Im Referenzszenario sinkt der Fernwärmebedarf der Haushalte von 62 TWh in 2030 auf 51 TWh in 2045. Im Gegensatz hierzu steigt der Fernwärmebedarf in allen drei Politikszzenarien moderat an. Hierdurch ergibt sich ein deutlich höherer Fernwärmebedarf in den Politikszzenarien für das Jahr 2045.

Abbildung 10: Entwicklung des Fernwärmebedarfs in Deutschland



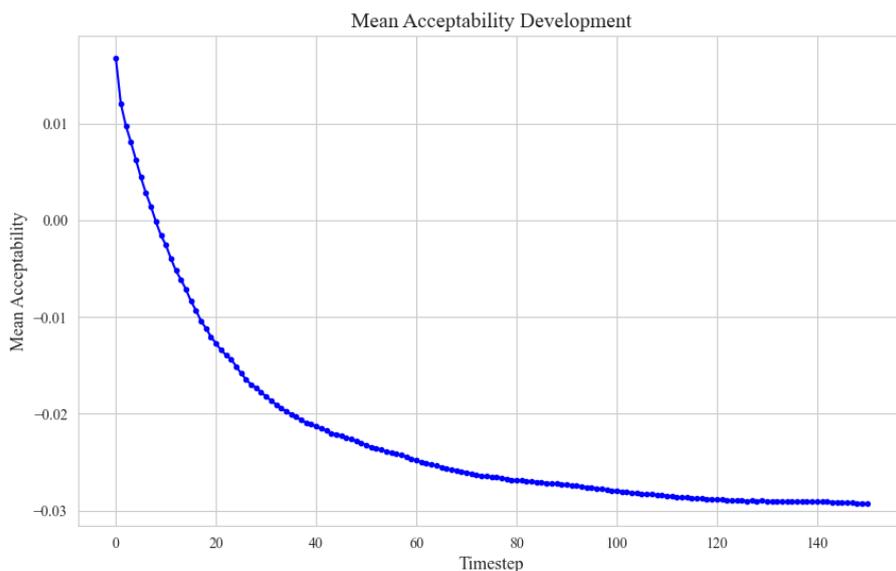
Quelle: Fraunhofer ISI

7.3 Modellierung sozio-politische Akzeptanz

Entwicklung der Akzeptanz der gesamten Population

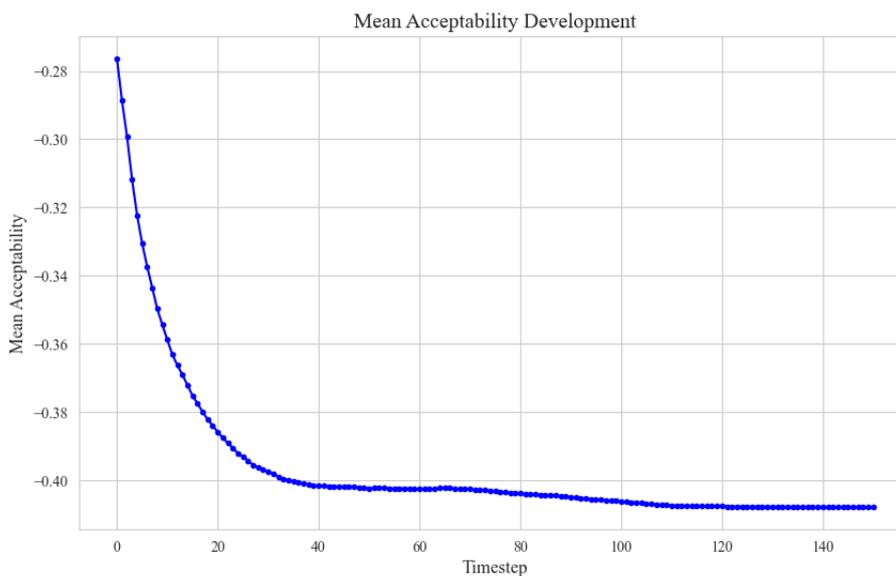
Das Niveau der Akzeptanz der politischen Maßnahmen ist in den drei ausgewählten Szenarien sehr unterschiedlich. Abbildung 11 bis Abbildung 13 zeigen die durchschnittliche Entwicklung der Akzeptanz für den Modelllauf.

Abbildung 11: Entwicklung der Akzeptanz in der Gesamtpopulation im Szenario "Technologieoffenheit"



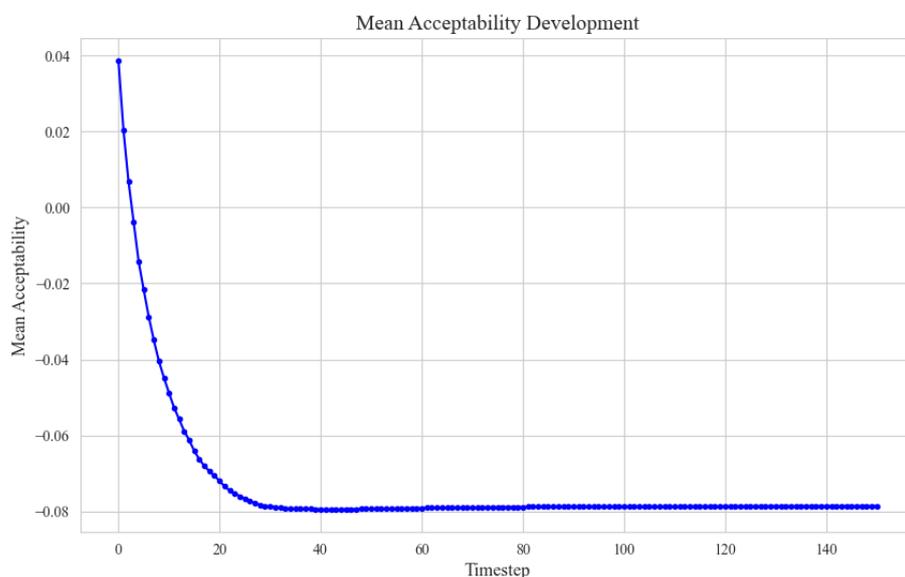
Quelle: Fraunhofer ISI

Abbildung 12: Entwicklung der Akzeptanz in der Gesamtpopulation im Szenario "Policy Package 1"



Quelle: Fraunhofer ISI

Abbildung 13: Entwicklung der Akzeptanz in der Gesamtpopulation im Szenario "Policy Package 2"



Quelle: Fraunhofer ISI

Beim Vergleich der Szenarien fällt auf, dass alle ein ähnliches Muster aufweisen: ein steiler Abfall der mittleren Akzeptanz zu Beginn der Simulation, gefolgt von einer Stabilisierung auf einem neuen Niveau. Der Hauptunterschied liegt im Niveau, auf dem sich die mittlere Akzeptanz einpendelt. Während das Szenario "Technologieoffenheit" ein Niveau um Null beibehält, stabilisieren sich die Szenarien "Policy Package 1" und "Policy Package 2" auf deutlich negativem Niveau. Das Szenario "Policy Package 1" hat bereits zu Beginn der Simulation die geringste Akzeptanz. Die Netzwerkeffekte und die Interaktion der Agenten führen zu einer noch stärkeren Verschiebung in den negativen Bereich. Ausschlaggebend hierfür ist die Entwicklung der Akzeptanz durch die Interaktion im Netzwerk innerhalb der Gruppen. Diese ist in den Abbildung 14 bis Abbildung 16 dargestellt.

Abbildung 14: Änderung der Akzeptanz zwischen von ursprünglichem Wert (Tick 0) und nach Modelllauf (Tick 150) für die Agenten nach Klassenzugehörigkeit im Szenario "Technologieoffenheit"

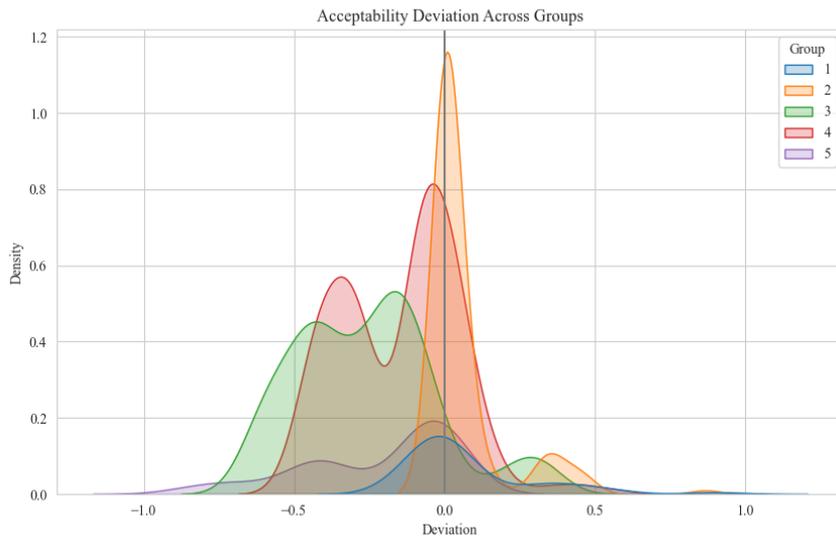


Abbildung 15: Änderung der Akzeptanz zwischen von ursprünglichem Wert (Tick 0) und nach Modelllauf (Tick 150) für die Agenten nach Klassenzugehörigkeit im Szenario "Policy Package 1"

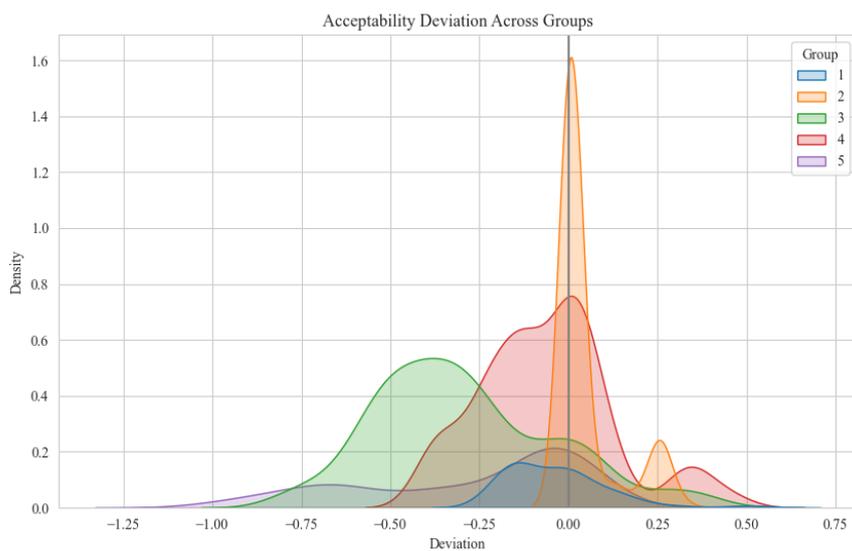
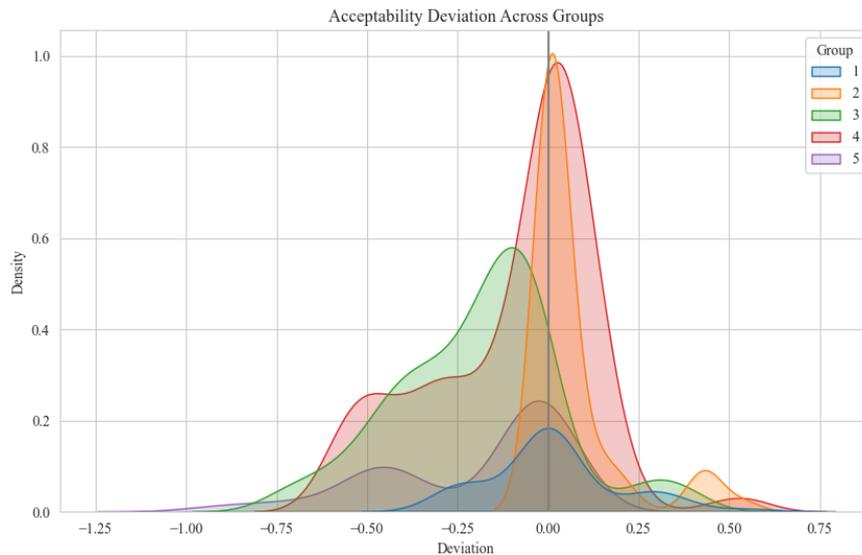


Abbildung 16: Änderung der Akzeptanz zwischen von ursprünglichem Wert (Tick 0) und nach Modelllauf (Tick 150) für die Agenten nach Klassenzugehörigkeit im Szenario "Policy Package 2"



Die Dichtegrafiken (kde plots) zeigen wie die Politikakzeptanz in den betrachteten Gruppen von dem initialen Wert zu Beginn der Simulation abweicht und geben Einblicke in die Verteilung und Varianz. Die Analyse der Entwicklung der Akzeptanz durch die Simulation der Interaktionsprozesse für die fünf Gruppen ergibt für die verschiedenen Szenarien unterschiedliche Muster.

Eine auffällige Spitze bei dem Wert null in den Meinungsverteilungen deutet darauf hin, dass die Agenten in den Gruppen ihre Meinung nach dem Simulationslauf nur wenig veränderten. Dies kann zwei Ursachen haben: Zum einen könnte es an dem hohen Anteil von "Extremist:innen" in der Gruppe liegen, die sich von ihrem Umfeld nicht oder nur schwer beeinflussen lassen. Zum anderen könnte es daran liegen, dass sich die einzelnen Agent:innen in einem homogenen Netzwerk befinden, in dem sie überwiegend von Nachbar:innen mit ähnlichen Einstellungen umgeben sind. Beide Faktoren - die Unbeeinflussbarkeit der Extremist:innen und die Homogenität der Netzwerke - spielen eine entscheidende Rolle dabei, ob und wie sich Meinungen im Zuge politischer Entwicklungen verändern oder stabil bleiben.

Bei der Analyse der Politikszenerien fällt die Klasse 2 durch eine besonders negative Einstellung auf, sie nimmt in allen untersuchten Politikszenerien eine ablehnende Position ein. Im Gegensatz dazu zeigt Gruppe 5 durchgängig eine positive Einstellung. Jedoch ist es auch diese Gruppe, deren Beurteilung der Politikmaßnahme in allen drei Szenarien am stärksten streut, d.h. sich leicht beeinflussen lässt. Gruppe 4 hat in allen Szenarien ein auffällig unterschiedliches Verhalten. Interessant ist auch, dass die Gruppen 3 und 4 stark von ihren Netzwerken beeinflusst werden und die Agenten dieser Gruppen ihre Meinung stark vom Initialwert verändern. Da sie auch den größten Anteil der Bevölkerung ausmachen, haben sie einen großen Einfluss auf die Veränderung der Gesamtakzeptanz in der Bevölkerung. Betrachtet man Unterschiede in den Szenarien zeigt insbesondere das Szenario "Policy Package 1", dass die Gruppen in ihrer Einstellung homogen verbleiben und verschieben, während sich im Szenario "Technologieoffenheit" und "Policy Package 2" eher Cluster um einen neuen Akzeptanzwert Wert herausbilden.

8 Einbindung von empirischem Input in techno-ökonomische Energiesystemmodelle

Im Rahmen von MANIFOLD fand ein intensiver, interdisziplinärer Austausch zu Modellvergleich und -kopplung statt. Durch die im Projekt durchgeführten Analysen sollten die Energiesystemmodelle trotz ihres primär techno-ökonomischen Fokus darin befähigt werden, die Ergebnisse aus qualitativen und quantitativen empirischen sozialwissenschaftlichen Analysen auf geeignete Weise zu berücksichtigen. Der damit verbundenen Entwicklung der Akteursmodelle in MANIFOLD kam dabei eine Schlüsselrolle in der Modellkopplung zu, da sie einerseits den empirischen Input aufnehmen und gleichzeitig auf den Output zur Kopplung bzw. Integration in techno-ökonomische Energiesystemmodelle ausgerichtet sind (siehe Abbildung 2).

Zwei Akteursmodelle und ihre Verbindung zu techno-ökonomischen Energiemodellen standen hierbei im Fokus: das Innovationsmodell (SLICK) lieferte Informationen über Auswirkungen implementierter Maßnahmen auf die zeitliche Verfügbarkeit und auf Lernkurven von Technologien. Darüber hinaus konnte der durch das Modell abgeschätzte Wissensstand über innovative Technologien von Installateur:innen und Handwerker:innen genutzt werden, um die Modellierung der Technologiediffusion zu verbessern. Das Ergebnis des Diffusionsmodells (Mikroperspektivenmodell), mit den zugrundeliegenden Discrete-Choice-Experimenten, war die Marktdurchdringung von Technologien wie Heizungsanlagen, Anteile von Heizungsanlagen und Sanierungsraten auf Basis des Investitionsverhaltens unter bestimmten Bedingungen. Diese Ergebnisse dienen als Input in die Energiesystem- und Diffusionsmodelle.

In MANIFOLD widmeten wir uns unter anderem auch der Frage ob und wie sozialwissenschaftliche Faktoren über Parametrisierungen direkt in die Energiemodelle integriert werden können. Durch diesen Ansatz sollten die methodischen Vorteile von Akteursmodellen in den techno-ökonomischen Modellen zur Energiesystemanalyse genutzt werden. Im Folgenden werden die zentralen Aspekte kurz dargestellt. Eine detaillierte Darstellung der Methodik der endogenen Modellintegration sowie die Beschreibung der Abbildung der Akteure in Innovations- und Diffusionsnetzwerken in den Energiesystemmodellen ist im Meilenstein-Dokument 6 zu finden (siehe Anhang A.1.5).

8.1 Integration sozialwissenschaftlicher Faktoren in Energiesystemmodellen

Die Frage ob und wie sozialwissenschaftliche Faktoren über Parametrisierungen direkt in die Energiemodelle integriert werden können, wird hier beispielhaft für das Energiemodell TAM-Households (TIMES Akteurs-Modell-Households (TAM-HHs)) diskutiert (siehe auch Meilenstein-Dokument 6 in Anhang A.1.5). Im Folgenden wird dargestellt wie die unterschiedlichen Input-Faktoren im Modell geclustert und berücksichtigt wurden.

1. Technologieadaption / Investitionsverhalten

Das Investitionsverhalten bzw. die Technologieadaption wurde über unterschiedliche Marktanteile aus dem Discrete-Choice-Experiment, unterschiedliche Technologiecharakterisierungen und Technologieentwicklungen sowie die Entwicklung und den Zugang zu Energieträgern und Netzwerken dargestellt. Die Umsetzung in TAM-HHs erfolgte über profilspezifische User Constraints, Budget Constraints, Discount Rates oder technologiespezifische User Constraints sowie über obere und untere Grenzen für mögliche Marktanteile von Technologien (z. B. Technologie x). Dazu kommen Annahmen für konkurrierende Technologien (z. B. Technologie x+), die Verfügbarkeit von Fernwärme und Gas für bestimmte Zeiträume, sowie das Potenzial für PV-Anlagen, Wärmepumpen und Geothermie nach unterschiedlichen Akteursgruppen.

2. Lokale Akzeptanz von Technologien

Die sogenannte lokale Akzeptanz von Technologien, die "Willingness to accept", wurde über ein benutzerspezifisches Investitionsverhalten abgebildet, das über sozioökonomische Faktoren und den Gebäudetyp dargestellt wurde. In TAM-HHs erfolgte die Implementierung auch hier über profilspezifische User Constraints, Budget Constraints und Discount Rates und technologiespezifische User Constraints. Das "Zögern" und eine mögliche Zurückhaltung gegenüber (neuartigen) Technologien wurde über monetäre Begrenzungen (Hurdle Rates, Discount Rates) dargestellt.

3. Verhaltensaspekte in Bezug auf die Technologienutzung

Verhaltensaspekte in Hinblick auf eine Technologienutzung umfassen den Verbrauch, die Entwicklung von Technologietreibern, Rebound-Effekten und Suffizienz. Weiter kommen auch Politikmaßnahmen und Aspekte wie Energieeffizienz, Anforderungen und die Technologieentwicklung dazu. In TAM-HHs wurde dies über eine profilspezifische Energienachfrage je Endnutzer nach Gebäudetyp umgesetzt. Die Nachfrage je Endnutzung wurde nach Gebäudetyp und Akteursgruppe differenziert, sodass auch Aspekte wie Rebound und Suffizienz mitbetrachtet werden konnten.

4. Technologiegenese

Im Rahmen der Technologiegenese erfolgte die Charakterisierung der Technologien sowie spezifischer Politiken und Maßnahmen (z. B. für spezifische Technologien). Diese Aspekte konnten in TAM-HH über die Verfügbarkeit von Technologien sowie Constraints Eingang finden, um bestimmte Technologien generell oder für bestimmte Akteursgruppen zwangsweise zu nutzen.

5. Soziopolitische Rahmenbedingungen

Soziopolitische Rahmenbedingungen wie übergeordnete Politikmaßnahmen wurden ebenfalls in die Modellierung mit einbezogen. Je nach Zielgruppe wurden Constraints implementiert, um die Ziele zu erreichen. Dabei waren die Constraints unterschiedlich je nach Akteur oder Technologie (z.B. Gebäudeeigentümer, Technologie oder Energieträger). Zudem konnten Subventionen, Steuern pro Technologie, Energieträger nach Akteursgruppe berücksichtigt werden und die Implementierung, falls nötig, über User Constraints erfolgen.

8.2 Verbesserte Abbildung von Akteuren in Innovationsnetzwerken in bestehenden Energiesystemmodellen

Basierend auf den in Abschnitt 4.2.2 dargestellten Überlegungen erfolgte als Vorbereitung der Integration der SLICK-Ergebnisse in TAM-HHs zunächst eine Harmonisierung und geeignete Anpassung der jeweiligen techno-ökonomischen Parameter, insbesondere für die Harmonisierung der Preise für Wärmepumpen und Brennstoffzellen. Dazu erfolgte die Erstellung eines Datentemplates zur geeigneten Übergabe und Harmonisierung der ausgewählten wichtigsten Kenngrößen. Unterschiedliche Möglichkeiten zur Untersuchung der einzelnen Effekte wurden bereits früh im Projektverlauf diskutiert. Zur konkreten Umsetzung der Modellintegration war es zunächst notwendig, das Modell TAM-HHs um die Brennstoffzellentechnologien als Optionen zu erweitern sowie rekursiv geeignete Untersuchungs- und Vergleichsgrößen zu definieren.

Dazu wurden in Abhängigkeit der unterschiedlichen Szenarien (siehe Kapitel 6) die Aufteilungen eines unterschiedlichen Budgets in die drei Schwerpunktpfade F&E, Subventionen und Handwerk berechnet. Es erfolgte eine Harmonisierung der jeweiligen Technologiepreise, Subventionen wurden beispielsweise über niedrigere Preise abgebildet.

Durch die beschriebene Vorgehensweise bestand die Möglichkeit, gezielt zu untersuchen, welche Effekte und Nutzen mit unterschiedlichen Aufteilungen eines Gesamtbudgets zur Förderung verbunden sind und wie unter den gegebenen Rahmenbedingungen die Ziele kostenoptimal erreicht werden können.

Der Fokus lag dabei auf Marktanteilen, Technologiepreisen und Effizienzverbesserungen.

- Marktanteile
 - Um Infrastrukturverbesserungen abbilden zu können, wurden in SLICK Marktanteile gesteigert. Diese wurden in der Charakterisierung der unterschiedlichen Profile in TAM-HHs für Stadt/Land, Gebäudetyp und ihren jeweiligen Zugang zur Energieinfrastruktur entsprechend abgebildet.
 - In TAM-HHs wurden Marktanteile durch Infrastrukturlimitierungen nach Gebäudetyp und der Verfügbarkeit von Energieversorgungsarten (z. B. Gasnetz, PV-Potenzial, Wärmepumpeninstallation) bestimmt.
- Technologiepreise und Effizienzverbesserungen
 - In TAM-HHs wurden die Preise für Heizungstechnologien bestimmt als die gesamten Anschaffungskosten für Verbrauchende. Diese umfassen Investitionskosten, Installationskosten, ggf. Renovierungskosten und weitere anteilige Preiskomponenten.
 - Die Kostendaten und -informationen aus SLICK wurden in TAM-HH innerhalb der disaggregierten Preiskomponenten berücksichtigt. Auf diese Weise wurde der Einfluss unterschiedlicher Preise erhöht z. B. durch geringere Arbeitskosten oder höhere Materialkosten. So konnte das Verbraucherverhalten realitätsnäher im Modell abgebildet und untersucht werden.

9 Verbesserte Abbildung von Akteuren in Diffusionsnetzwerken in bestehenden Energiesystemmodellen

Fragen der Akzeptanz und Akzeptabilität von Technologien werden in Energiesystemmodellen neben der Modellierung von sektor- bzw. technologie-spezifischen Diskontraten typischerweise über sogenannte Intangible Costs (Kosten durch Einschränkungen bzw. Unannehmlichkeiten) oder über Ansätze des Willingness-to-pay (Zahlungsbereitschaft) bzw. Willingness-to-accept erfasst (Senkpiel et al. 2020). Daneben können heterogene Nutzende-Gruppen (z. B. unterschiedliche Adoptionsgeschwindigkeiten) eine verbesserte Abbildung der Technologiediffusion ermöglichen, die um die Berücksichtigung von Intermediären, wie z. B. Installateur:innen und Händler:innen, oder auch sog. Change Agents, wie z. B. Meinungsführer:innen und Multiplikator:innen, weiter differenziert werden kann.

Im Rahmen von MANIFOLD wurden geprüft inwieweit die unterschiedlichen Optionen zum einen systematisch datentechnisch fundiert werden können, und inwieweit sie zum anderen relevant in Bezug auf die Technologiediffusion erscheinen und damit in den Energiesystemmodellen umgesetzt werden könnten und sollten.

Bereits bei der Konzeptionierung des DCE erfolgte die Aufteilung der einzelnen Gruppen in geeigneter Weise möglichst analog zur Disaggregation der Akteursgruppen in TAM-HHs in 112 Haushaltsprofile.⁷ Auf diese Weise konnte sichergestellt werden, dass die Informationen der einzelnen Attribute aus dem DCE dann Eingang in unterschiedliche Szenarien in TAM-HH finden können. Die Willingness-to-pay im Zusammenhang mit Transformationen im Energiesystem wurde bereits mehrfach mit jeweils spezifischem Fokus untersucht und ermittelt (Kim et. al., 2020, Numata et. al., 2021), jedoch lag der Fokus nun auf der Integration der Ergebnisse in das Energiesystemmodell TAM-HHs.

Zur Definition einer Schnittstelle zwischen den Ergebnissen des DCE und TAM-HHs wurden zunächst iterativ die relevantesten Indikatoren herausgearbeitet und dann die Interpretation der Zahlungsbereitschaft und Integration in das Energiesystemmodell diskutiert. Dies war bereits in die Ausgestaltung des Experiments mit eingeflossen.

Das Discrete-Choice-Experiment umfasst neben der Zahlungsbereitschaft zur Recherche und den Betriebs- und Investitionskosten insbesondere auch einen Indikator zur CO₂-Emissionsreduktion, der sich als Indikator zur Zahlungsbereitschaft und Integration in TIMES eignet: Dazu erfolgte eine Bewertung der einzelnen Technologien im Vergleich zur Referenztechnologie eines Gas-Brennwertkessels und damit eine monetäre Bewertung im gleichen Verhältnis wie die CO₂-Emissionsreduktion. Somit wurden die einzelnen Heizsysteme jeweils mit einem Bonus bzw. Malus ausgestattet. Auch für die weiteren Indikatoren aus dem DCE sind analoge Bonus- bzw. Malus-Belegungen umsetzbar. Eine vollständige Diskussion der untersuchten Parameter befindet sich in den Meilenstein-Dokument 5 und Meilenstein-Dokument 6.

Auf diese Weise konnten die DCE-Ergebnisse in die Energiesystemmodellierung mit einbezogen werden. Insgesamt konnten so in der disaggregierten Modellierung die einzelnen relevanten Akteursgruppen einerseits realitätsnäher dargestellt werden und andererseits die Umfrageergebnisse des DCE mitberücksichtigt werden. Auf der anderen Seite wurden Informationen zur Zahlungsbe-

⁷ Die Durchführung des Discrete-Choice-Experiments wurde umfassend im Meilenstein-Dokument 5 beschrieben. Ebenso wurde dort bereits dargestellt, welche der ausgewählten soziodemografischen Faktoren in die Energiesystemmodelle Eingang finden können.

reitschaft für die Attribute Eigenrecherchen, Fachinstallateur:innen, Energieberatung und Zeitaufwand nicht bei der Modellintegration berücksichtigt. Hier bedarf es noch weiterer konzeptioneller Überlegungen, wie ein direkter Transfer in techno-ökonomische Energiemodelle erfolgen könnte

Im Rahmen von MANIFOLD wurden mehrere Variationen der Eingabedaten von SLICK in das Energiesystemmodell TAM-HHs integriert. Die Analysen waren nützlich, um die Auswirkungen unterschiedlicher Technologiepreise für Verbraucher zu bestimmen, die sich aus den unterschiedlichen Investitionsschwerpunkten der Budgets ergeben. Zudem wurde der Einfluss der Berücksichtigung von Zahlungsbereitschaften auf die Technologiediffusion aufgezeigt. Die unterschiedlichen Eingangsdaten für die verschiedenen sozioökonomischen Parameter zur Beschreibung der Zahlungsbereitschaft wurden in mehrere Modellläufe integriert und mit einer alternativen Methodik zur Simulation der Erschwinglichkeit verglichen. Diese alternativen Methoden sind bereits in TAM-HH integriert, um die Heterogenität des Haushaltssektors im Modell weiter anzureichern. Eine vollständige Beschreibung des Vorgehens und der Ergebnisse findet sich im Meilenstein-Dokument 6 (in Anhang A.1.5).

Für einen weiteren Vergleich der Modellierungsergebnisse wurden die drei Varianten der Innovationsmodell SLICK mit den Erkenntnissen aus den DCE-Experimenten zur Zahlungsbereitschaft kombiniert. Hier erfolgt die weitere Modellierung mit einer gemittelten Zahlungsbereitschaft und kombiniert mit Erkenntnissen aus den Ergebnissen des Innovationsdiffusionsmodells von SLICK. Diese Kombination der unterschiedlichen Einflüsse von Innovations- und Diffusionsaspekten wird im Meilenstein-Dokument 7 (siehe Anhang A.1.6) beschrieben.

10 Fazit

Energiesystemmodelle (ESM) können als Entscheidungshilfe verwendet werden, um politische Entscheidungsträger:innen über die Energiewende zu informieren. Traditionell optimieren ESM das System nach Kriterien der Kostenminimierung unter Berücksichtigung technisch-ökonomischer Parameter, simulieren die künftige Nachfrage oder Technologieübernahme oder verwenden die Methodik von Gleichgewichtsmodellen. Die Transformation des Energiesystems zur Erreichung der klimapolitischen Ziele und des Pariser Abkommens ist jedoch ein gesellschaftlicher Prozess, der nicht kostenoptimiert sein wird. Aus diesem Grund gibt es eine wachsende Zahl von Studien, die darauf abzielen, die Sozialwissenschaften in die Modellierung des Energiesystems einzubeziehen. In diesem Projekt wurde auf Basis bestehender Studien analysiert, welche Aspekte bereits in der Energiesystemmodellierung berücksichtigt werden und wie dies erreicht wird. Die Untersuchung hat gezeigt, dass es kaum einen Konsens darüber gibt, welche sozialwissenschaftlichen Faktoren berücksichtigt werden sollten und wie sie instrumentalisiert werden können. In einem nächsten Schritt zeigte das Projekt daher auf, wie als Ergebnis eines interdisziplinären Diskurses Faktoren ermittelt werden können, welche in den ESM Eingang finden sollten, wie sie erhoben werden können und welche theoretischen Möglichkeiten es gibt, sie in das ESM zu integrieren. Zu diesem Zweck wurde das ESM in eine Makro- und eine Mikroperspektive unterteilt. Während die Makroperspektive das gesamte Energiesystem umfasst, konzentriert sich die Mikroperspektive auf techno-ökonomische Modelle, die die Technologiediffusion widerspiegeln. Die Literaturrecherche zur Integration sozialwissenschaftlicher Faktoren zeigt, dass bisher nur einzelne Bereiche der Sozialwissenschaften im ESM berücksichtigt wurden, wie z.B. die Akzeptanz oder das Nutzungsverhalten. Für fast alle Fragestellungen im Kontext der Transformation können Erkenntnisse durch Teilmodelle generiert werden. Deren Ergebnisse können wiederum in das ESM einfließen. Insbesondere die Bereiche Technikgenese und gesellschaftspolitische Akzeptanz sind im ESM bisher wenig beachtet worden bzw. ihre Annahmen im ESM sind meist nicht fundiert. Daher wurden bislang typischerweise Teilmodelle zur Analyse dieser Aspekte eingesetzt.

Um der Komplexität der unterschiedlichen Aspekte gerecht zu werden und gleichzeitig ein einzelnes Modell nicht zu überfrachten wurde hier in diesem Vorhaben das Vorgehen gewählt gezielt neue Modelle zu entwickeln, welche sich Teilaspekten widmen, welche bislang noch nicht ausreichend berücksichtigt wurden (z.B. gesellschaftliche Akzeptanz) und gleichzeitig die bestehenden Modelle so zu erweitern, dass sie Schnittstellen für die Anbindungen der neuen Modelle bieten. Um eine kohärente Szenarioanalyse zu gewährleisten, wurde ein Szenariorahmen entwickelt, welcher für die Analyse aller Modelle den Rahmen vorgab.

Im Folgenden wird kurz sowohl auf die methodischen Herausforderungen als auch auf die zentralsten Ergebnisse der Analyse eingegangen.

Herausforderungen der Modell- und Methodenkopplung

Bei der Verknüpfung der empirischen Daten mit den Energie(-system)-modellen ist festzuhalten, dass es eine Herausforderung ist in der Erarbeitung von Schnittstellen zwischen verschiedenen Methoden empirischer Datenerhebung, wie hier qualitative Interviews und DCE, sowie zwischen empirischen Daten und Mikromodellen der Energiesystemanalyse, die gewonnenen Daten nicht als informationsreicher zu interpretieren als sie sind. In großen Projekten mit vielen Abstraktionsschritten in Form von Modellen, die aufeinander aufbauen, scheint die Gefahr aufgrund der Distanz zu den Ausgangsdaten dafür besonders gegeben. Die Art und Weise, wie Daten produziert werden, sollte bei der Beurteilung des Informationsgehalts von Ergebnissen berücksichtigt werden. So wurde beispielweise in der Schnittstelle zwischen qualitativer Inhaltsanalyse und DCE darauf geachtet, die in

Prozent skalierbaren Wichtigkeitsdimensionen aufgrund des Produktionsprozesses der Daten in einem Interviewprozess als Ranginformationen für die Auswahl der Attributdimensionen zu interpretieren.

Aus den Ergebnissen der Simulationen wurden auch einige Herausforderungen deutlich. So hat beispielsweise die externe Integration von Nachfragedaten aus INVERT und die geringe Rückkopplung zwischen Angebot und Nachfrage wahrscheinlich dazu geführt, dass nur moderate Trends im Innovationsraum zu beobachten waren. Gleichzeitig war zu beobachten, dass auch das Gegenteil möglich ist. Wenn potenziell modellierte Situationen innerhalb von SLICK zu einer stabilen Produktnachfragedynamik führen würden, die externen Nachfragedaten jedoch signifikante Änderungen der Nachfragetrends aufweisen, können diese dann unter Umständen durch das in SLICK simulierte Angebot nicht gedeckt werden.

Die in den Modellierungen durchgeführte leichte Kopplung der Modelle scheint nicht stark genug zu sein um die unterschiedlichen Entwicklungen, z.B. über Wirkungen von Preissignalen, zu kommunizieren. So können sich Stimuli, die von Technologieherstellern initiiert werden, nicht in logischer Weise auf das gesamte Innovationssystem übertragen. Die Beobachtung solcher Effekte im Modell macht auch deutlich, dass Fördermaßnahmen auf verschiedenen Ebenen gut aufeinander abgestimmt sein sollten und die marktwirtschaftlichen Wechselwirkungen wichtig sind, um effiziente Lösungen zu etablieren.

Relevanz des Vorgehens und der Ergebnisse für die Gestaltung von Politiken

Auf Grundlage der erzielten Ergebnisse im Modell SLICK ergeben sich für das Verständnis des Innovationssystems mehrere zentrale Schlussfolgerungen: (1) **Grenzen von gezielten Investitionen:** Die Ergebnisse zeigen, dass mehr Investitionen in eine bestimmte Richtung nicht unbedingt direkt zu den gewünschten Verbesserungen führen. Obwohl ein gewisses Maß an Förderungen zur Unterstützung gewünschter Systeme im Allgemeinen vorteilhaft zu sein scheint, haben die Ergebnisse auch gezeigt, dass dem Ausmaß der technologischen (Diffusions-)Gewinne, die infolge starker Förderungen erzielt werden können, Grenzen gesetzt sind. (2) **Nischen- versus marktbeherrschende Technologien:** Ein Ergebnis der SLICK-Simulationen zeigt, dass sich verbesserte Systembedingungen durch eine Politik, die auf die Förderung bestimmter gewünschter Technologien ausgerichtet ist, unbeabsichtigt auch positiv auf andere, unerwünschte aktuell dominante Technologien auswirken können. Solche Effekte können erhebliche Auswirkungen auf die Richtung der Innovationsdynamik haben. (3) **Bedeutung einer komplexen Politikgestaltung:** Darüber hinaus zeigen die Ergebnisse, dass politische Strategien, die auf die Umsetzung einzelner Instrumente zur Steuerung von Technologieverbreitungsmustern ausgerichtet sind, schon aufgrund der Grenzen ihrer Wirksamkeit, nicht kosteneffizient sind oder indirekt eine Dynamik verursachen, die nicht immer mit den ursprünglichen Absichten der Technologiepolitik übereinstimmt. Aus den Ergebnissen lässt sich ersehen, dass es die Komplexität der Energiesysteme auch erfordert, mehrere Förderinstrumente gleichzeitig zu nutzen, um ungewollte Hemmnisse und Förderungen zu vermeiden. Zusätzlich zu einfachen allgemeinen Maßnahmen können unterstützende Maßnahmen auf mehreren Ebenen der Märkte sinnvoll sein um die Vielzahl der vielschichtigen Interaktionen zwischen verschiedenen Akteuren innerhalb der Innovationssysteme zu berücksichtigen.

Durch die Modellierung mit den **Makro-Energiesystemmodellen** zeigt sich insgesamt, dass sich durch die Berücksichtigung von politischen Maßnahmen und dem daraus resultierenden Akteursverhalten im Gebäudesektor eine deutliche Abweichung in der Transformation des Gesamtsystems ergibt. Es zeigt sich ein höherer Transformationsdruck, der sich im Rahmen der Modellierung beispielsweise dadurch lösen lässt, indem erneuerbare synthetische Gase sowie Biomassepotenziale erhöht werden. Während dies mathematisch einfach ist, stellt sich die Frage der Realisierbarkeit

dieser Annahmen. Die Wasserstoffstrategie der Bundesregierung zielt darauf ab, bis 2030 10 GW Elektrolyseleistung in bereitzustellen. Zudem werden Wasserstoff Partnerschaften geschlossen, um benötigte Wasserstoffimporte decken zu können. Bereits im kosten-optimalen System ergibt sich ein erheblicher Transformationsbedarf. Diese Anforderungen werden jedoch durch eine Abweichung vom kostenoptimalen Transformationspfade im Gebäudesektor verstärkt. Ob dieser zusätzliche Bedarf (an Biomasse und synthetischen erneuerbaren Energieträgern), der sich durch eine verzögerte Dekarbonisierung des Gebäudesektors, bzw. durch die weitere Verwendung von gasbasierten Heizungssystemen ergibt, ist fraglich. Dennoch ist festzuhalten, dass die Systeme abgesehen von unterschiedlichen Mengengerüsten keine drastischen Änderungen, im Sinne anderer Transformationspfade in den anderen Verbrauchs- und Umwandlungssektoren hervorrufen.

Fazit zur Berücksichtigung von sozial-wissenschaftlichen Erkenntnissen in Energie-(system-)modellen

Es kann also festgehalten werden, dass die Integration von Akteursverhalten und damit die implizite Berücksichtigung politischer Maßnahmen spannende neue wissenschaftliche Erkenntnisse und damit verbundene politische Implikationen generiert. Es konnte ebenfalls gezeigt werden, dass ein Abweichen vom kostenoptimalen Transformationspfad im Gebäudesektor direkt mit einem erhöhten Importbedarf synthetischer Energieträger in Verbindung steht und folglich die Abhängigkeit von Energieimporten steigen lässt. Ein weiterer Schritt wäre die Berücksichtigung des Akteursverhaltens auf die anderen Sektoren zu erweitern.

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass es einen großen Bedarf gibt, soziale und individuelle Prozesse in Energiesystemmodelle zu integrieren, um realistischere Analysen zu erhalten. Allerdings sind die sozialen Prozesse teilweise sehr komplex und nur eine vereinfachte Darstellung ist möglich. Das Vorhaben zeigt, wie einzelne Punkte angegangen werden können, gleichzeitig besteht weiterhin ein großer Bedarf an interdisziplinärer Zusammenarbeit, um die Modelle und die Analyse zu verbessern und die Erkenntnisse zu vertiefen.

11 Veröffentlichung der Ergebnisse

Bisher sind folgende öffentliche Dokumente. Für alle Dokumente, die zur Publikation vorgesehen sind, wird das Förderkennzeichen, die Art und der Name der Förderinstitution in der Publikation vermerkt

Publiziert

- Globisch, Joachim/Droste-Franke, Bert/Fohr, Gabriele/Wassermann, Sandra 2019: Simulation von Innovationsdynamiken im Kontext der Energiewende. Beratungsorientierte Verbindung von Empirie und sozialwissenschaftlichen Simulationsmodellen. In: TATuP – Zeitschrift für Technikfolgenabschätzung in Theorie und Praxis 28/3, 34-40.
- Senkpiel, Charlotte, Audrey Dobbins, Christina Kockel, Jan Steinbach, Ulrich Fahl, Farina Wille, Joachim Globisch, Sandra Wassermann, Bert Droste-Franke, Wolfgang Hauser, and et al. 2020. "Integrating Methods and Empirical Findings from Social and Behavioural Sciences into Energy System Models—Motivation and Possible Approaches" Energies 13, no. 18: 4951. <https://doi.org/10.3390/en13184951>

Desweiteren erfolgten Konferenzbeiträge und -vorträge zu den Inhalten des Projektes:

- Social Simulation Conference 2023: Pröpper, A.. PANDORA – an agent-based-model to analyze acceptance of (energy) policies, applied to the German heating sector. 4-8.09.2023, Glasgow, UK
- eceee 2021 Summer study on energy efficiency :Pröpper, A. Policy Measures in the German Heating Sector: a review-based framework to study policy acceptance.7-11.06.2021. online
- International Workshop Agent-based Modeling for Energy Economics and Energy Policy: Pröpper, A.: Agent-based model PANDORA: Policy Acceptance, Diffusion of Opinions and Relations among Actors. Poster, 1.2.2023. DLR, Stuttgart
- Forschungsnetzwerk Systemanalyse 2021: Pröpper, A.: MANIFOLD: Modellentwicklung und Modellkopplung zu Akteursverhalten in Innovations- und Diffusionsnetzwerken 18.-20.05.21, online. Forschungsnetzwerk Systemanalyse 2022: Droste-Franke, B; van Doren, D.; Voge, M.: MANIFOLD – Modellierung von Akteursverhalten in Innovations- & Diffusionsnetzwerken, 8.-9.11.2022, Berlin
- Forschungsnetzwerk Energiewende Bauen 2022: Droste-Franke, B; van Doren, D.; Voge, M.: Projekt MANIFOLD: Modellierung von Akteursverhalten in Innovationsnetzwerken. Poster „Über den Tellerrand“, 9.6.2022, Wuppertal
- International Conference on Operations Research 2023 (OR23): Van Doren, D.; Voge, M.; Droste-Franke, B.: Modelling Actor Behaviour in Innovation Networks, 30.8.2023, Hamburg
- International Workshop Agent-based Modeling for Energy Economics and Energy Policy: Droste-Franke, B; van Doren, D.; Voge, M: Simulating the innovation and diffusion of energy technology – Modelling learning curves and product installation, Poster, 1.2.2023. DLR, Stuttgart
- 17. IAEE European Energy Conference Athens: Kulawik, J., Kockel, C., Praktijnjo, A. [What are consumers willing to pay for residential heating systems in Germany?](#), 21.-24.09.2022, Athen, Griechenland
- Forschungsnetzwerk Systemanalyse 2021: Wille, F., Kockel, C., Nolting, L.: Kopplung qualitativer und quantitativer empirischer Methoden zur Integration in die Energiesystemanalyse, 18.-20.05.21, online.

In Vorbereitung:

- Konferenzbeitrag auf der eceee 2024: Charlotte Senkpiel, Connor Thelen, Hannah Nolte, Kost Christoph, Jan Steinbach: The role of biomass and synthetic energy carriers in the building sector - from a sectoral to a cross-sectoral perspective (Abstract eingereicht)
- Pröpper, Alexandra: „Policies and Public Perception: An empirical study on policy acceptability in the German heating sector“ in 2024.
- Kulawik, J., Kockel, C., Praktiknjo, A. What are consumers willing to pay for residential heating systems in Germany?, 17. IAEE European Energy Conference Athens 2022-09-21 - 2022-09-24, 2022

12 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Entwicklung technologiegenerischer Akteursmodelle zu Technologieentwicklung und -adoption.....	9
Abbildung 2: Modellschnittstellen und Modellintegration im Projekt Manifold.....	16
Abbildung 3: PANDORA - Überblick über Interaktion der Modellkomponenten.....	25
Abbildung 4: Lernkurven für alle Technologien. X-Achse: Zeitschritte; Y-Achse: Durchschnittliche Gesamtkosten (€).....	29
Abbildung 5: Aggregierte Gesamtinstallationskapazität der Installateure für verschiedene Heiztechnologien, basierend auf der verfügbaren Kapazität, die dem Produktportfolio der einzelnen Installateure zugeordnet ist. X-Achse: Zeitschritte; Y-Achse: Gesamtkapazität.....	30
Abbildung 6: Entwicklung des Endenergieverbrauchs im Gebäudesektor und im Manifoldbereich im Referenzszenario.....	33
Abbildung 6: Entwicklung des Endenergieverbrauchs der Haushalte nach Szenario.....	35
Abbildung 7: Entwicklung des Heizsystembestands in den betrachteten Szenarien.....	36
Abbildung 8: Entwicklung der Stromnachfrage für die Wärmeerzeugung in Deutschland.....	37
Abbildung 9: Entwicklung des Fernwärmebedarfs in Deutschland.....	38
Abbildung 10: Entwicklung der Akzeptanz in der Gesamtpopulation im Szenario "Technologieoffenheit".....	39
Abbildung 11: Entwicklung der Akzeptanz in der Gesamtpopulation im Szenario "Policy Package 1".....	39
Abbildung 12: Entwicklung der Akzeptanz in der Gesamtpopulation im Szenario "Policy Package 2".....	40
Abbildung 13: Änderung der Akzeptanz zwischen von ursprünglichem Wert (Tick 0) und nach Modelllauf (Tick 150) für die Agenten nach Klassenzugehörigkeit im Szenario "Technologieoffenheit".....	41
Abbildung 14: Änderung der Akzeptanz zwischen von ursprünglichem Wert (Tick 0) und nach Modelllauf (Tick 150) für die Agenten nach Klassenzugehörigkeit im Szenario "Policy Package 1".....	41
Abbildung 15: Änderung der Akzeptanz zwischen von ursprünglichem Wert (Tick 0) und nach Modelllauf (Tick 150) für die Agenten nach Klassenzugehörigkeit im Szenario "Policy Package 2".....	42

13 Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Überblick über die im Projekt Manifold eingesetzten Modelle	13
Tabelle 3: Ergebnisse des Discrete Choice Experimentes für die gesamte Stichprobe	23
Tabelle 4: Annahme von drei politischen Szenarien für den Bereich Wärme	27

14 Literaturverzeichnis

- Dobbins A, Fahl U (2023). A decision support method to assess energy policy impacts on different household types for a socially just energy transition in Germany. In: Olivier Grothe, et al. (eds) Selected Papers of the Annual International Conference of the German Operations Research Society (GOR), Karlsruhe, Germany, September 6-9, 2022. GOR (Gesellschaft für Operations Research e.V.)
- Kim., S.-M., Kim, J.-H. (2020): Households' Willingness to Pay for Substituting Natural Gas with Renewable Methane: A Contingent Valuation Experiment in South Korea. In: *Energies*
- Numata, M.; Sugiyama, M.; Swe, W.; del Barrio Alvarez, D. (2021): Willingness to Pay for Renewable Energy in Myanmar: Energy Source Preference. *Energies* 2021, 14, 1505.
<https://doi.org/10.3390/en14051505>
- Senkpiel, C., Dobbins, A., Kockel, C., Steinbach, J., Fahl, U., Wille, F., Globisch, J., Wassermann, S., Droste-Franke, B., Hauser, W., Hofer, C., Nolting, L., Bernath, C. (2020): Integrating Methods and Empirical Findings from Social and Behavioural Sciences into Energy System Models—Motivation and Possible Approaches. In: *Energies* 13, 4951.
<https://doi.org/10.3390/en13184951>
- Wille, F., Kockel, C., Nolting, L. (2021): Kopplung qualitativer und quantitativer empirischer Methoden zur Integration in die Energiesystemanalyse. *Forschungsnetzwerk Systemanalyse*, 18.-20.05.21, online.

A.1 Übersicht über die Dokumentanhänge

A.1.1	Ergänzung zum Meilenstein-Dokument 3: Veröffentlichter Journal Article: "Simulation von Innovationsdynamiken im Kontext der Energiewende" (Globisch et al., 2019)
A.1.2	Meilenstein-Dokument 1-3: Veröffentlichter Journal Article: „Integrating Methods and Empirical Findings from Social and Behavioural Sciences into Energy System Models - Motivation and Possible Approaches“ (Senkpiel et al., 2020)
A.1.3	Meilenstein-Dokument 4: „Definition von Anforderungen an empirischen Input für die Akteursmodelle (Empirie → Akteursmodelle) und Konkretisierung der Schnittstellen zwischen Akteursmodellen und Remod, TIMES, Enertile und Invert/EE-Lab“
A.1.4	Meilenstein-Dokument 5: Dokument zum empirischen Input in Akteursmodelle und techno-ökonomische Modelle inkl. Diskussion der technologie-generischen Übertragbarkeit der Erhebungsmethoden
A.1.5	Meilenstein-Dokument 6: Dokument zu Vor- und Nachteilen unterschiedlicher Arten der Einbindung von empirischem Input in techno-ökonomische Modelle
A.1.6	Meilenstein-Dokument 7: Dokument zum methodischen Potential der Projektergebnisse für die Modellierung von Technikakzeptanz, Hemmnisanalysen sowie der Simulation und Analyse regulatorischer Rahmenbedingungen

A.1.1 Ergänzung zum Meilenstein-Dokument 3: Veröffentlichter Journal Article: "Simulation von Innovationsdynamiken im Kontext der Energiewende" (Globisch et al., 2019)

Simulation von Innovationsdynamiken im Kontext der Energiewende: Beratungsorientierte Verbindung von Empirie und sozialwissenschaftlichen Simulationsmodellen

Globisch, Joachim; Droste-Franke, Bert; Fohr, Gabriele; Wassermann, Sandra

Veröffentlichungsversion / Published Version

Zeitschriftenartikel / journal article

Empfohlene Zitierung / Suggested Citation:

Globisch, J., Droste-Franke, B., Fohr, G., & Wassermann, S. (2019). Simulation von Innovationsdynamiken im Kontext der Energiewende: Beratungsorientierte Verbindung von Empirie und sozialwissenschaftlichen Simulationsmodellen. *TATuP - Zeitschrift für Technikfolgenabschätzung in Theorie und Praxis / Journal for Technology Assessment in Theory and Practice*, 28(3), 34-40. <https://doi.org/10.14512/tatup.28.3.34>

Nutzungsbedingungen:

Dieser Text wird unter einer CC BY Lizenz (Namensnennung) zur Verfügung gestellt. Nähere Auskünfte zu den CC-Lizenzen finden Sie hier:

<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.de>

Terms of use:

This document is made available under a CC BY Licence (Attribution). For more information see:

<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0>

Simulation von Innovationsdynamiken im Kontext der Energiewende

Beratungsorientierte Verbindung von Empirie und sozialwissenschaftlichen Simulationsmodellen

Joachim Globisch, Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung ISI, Breslauer Str. 48, 76139 Karlsruhe (joachim.globisch@isi.fraunhofer.de)

Bert Droste-Franke, IQIB – Institut für qualifizierende Innovationforschung und -beratung (bert.droste-franke@iqib.de)

Gabriele Fohr, IQIB – Institut für qualifizierende Innovationforschung und -beratung (gabriele.fohr@iqib.de)

Sandra Wassermann, Zentrum für interdisziplinäre Risiko- und Innovationsforschung (ZIRIUS), Universität Stuttgart (sandra.wassermann@ziri.us.uni-stuttgart.de)

34

Wie können Modelle zur Simulation von Akteursverhalten bei der Politikberatung zur Entwicklung von Maßnahmen zur Unterstützung der Genese und Diffusion nachhaltiger Technologien eingesetzt werden? Für Analysen zur Technologiegenese existiert bereits ein entsprechendes Simulationsmodell (SKIN). Mit Blick auf dieses Modell wird diskutiert, wie sich durch die Verbindung von Empirie und Simulation die Robustheit der Simulationsergebnisse steigern lässt. Für Akteursanalysen zur Technologiediffusion müssen entsprechende Simulationsmodelle erst noch entwickelt werden. Hierfür werden erste konzeptionelle Überlegungen diskutiert.

Simulation of innovation dynamics in the context of the energy transition

Advice-oriented combination of empirical and social science simulation models

How can models for the simulation of actor behavior be used in policy advice on measures to support the development and diffusion of sustainable technologies? A corresponding simulation model already exists for analyses of technology development (SKIN). With reference to this model, it is discussed how the combination of empirical and simulation methods can increase the robustness of the simulation results. For actor analyses on technology diffusion, corresponding simulation models have yet to be developed. The article outlines some conceptual foundations for the development of such models.

Keywords: agent-based modeling, TIS analysis, empirical data, technology genesis, technology diffusion

This is an article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License CC BY 4.0 (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)
<https://doi.org/10.14512/tatup.28.3.34>
 Submitted: 08. 07. 2019. Peer reviewed. Accepted: 24. 10. 2019

Einleitung

Im Zusammenhang mit der Energiewende bedarf es sowohl klassischer innovationspolitischer Maßnahmen zur Unterstützung der Technologiegenese als auch einer Förderung der Diffusion neuer Technologien (Weber und Rohrer 2012). Um die Effektivität solcher politischer Maßnahmen sicherzustellen, wird der Einsatz von Analyse- und Planungstools immer wichtiger. Im Bereich der Innovationspolitik bietet sich v. a. agentenbasierte Modellierung (ABM) als Simulationsinstrument an, um die Prozesse der Technologiegenese und -diffusion zu analysieren (s. hierzu auch TATuP 3/26 (2017)). Die Berücksichtigung von sozialwissenschaftlichen Ergebnissen in der Modellierung ist dabei von großer Bedeutung. So hängt z. B. die Diffusion neuer Energietechnologien stark von ihrer Akzeptanz durch Öffentlichkeit, potenzielle Nutzer*innen, Anwohner*innen, etc. ab (Wüstenhagen et al. 2007).

Dieser Artikel befasst sich daher mit methodischen Ansätzen, die die Evaluation von Politikmaßnahmen zur Förderung von Technologiegenese und -diffusion unter Berücksichtigung öffentlicher Unterstützung für diese Maßnahmen erlauben. Konzeptionelle Grundlage ist die Analyse Technologischer Innovationssysteme (TIS). Kerngedanke des TIS-Ansatzes ist, dass ein Innovationssystem aus Elementen (i. d. R. Organisationen, Institutionen, physische Infrastrukturen, Technologien) und Beziehungen zwischen den Elementen besteht (Hekkert und Negro 2011).

Nach Bergek et al. (2008) gliedert sich eine TIS-Analyse in sechs Schritte: (1) Definition des TIS, insbes. die „Flughöhe“ der Analyse (z. B. „Wärmepumpe“ vs. „Wärmetechnologien“); (2) Erfassung der drei übrigen zentralen Komponenten des TIS (Akteure, Netzwerke und Institutionen); (3) Analyse der Dynamik des TIS mit Blick auf sieben zentrale Funktionen (s. Tab. 1);

TIS-Funktion	Beschreibung
1. Unternehmerisches Experimentieren	Forschung, Anwendung, Testen und Kommerzialisierung von Wissen
2. Entstehung von Wissen	Lernen und schöpferische Anwendung von Wissen zur Entstehung neuen Wissens
3. Diffusion von Wissen	Austausch und Modifikation von Wissen
4. Suchrichtung	Konvergenz der Zukunftsvorstellungen bzgl. Wachstum, technischer Entwicklung/Technikdesign und übergeordneten Zielen des TIS
5. Ressourcenmobilisierung	Verfügbarkeit von Humankapital, politischer Unterstützung, finanziellem Kapital und Produktionsmitteln
6. Marktformierung	Herausbildung von Kundengruppen mit spezifischen Anforderungen und Kaufprozessen bzgl. des TIS
7. Legitimität	Unterstützung der neuen Technologie, Reduzierung von Unsicherheit

Tab. 1: TIS-Funktionen.

Quelle: Eigene Darstellung nach Hekkert et al. 2007, Suurs 2009, Wieczorek et al. 2013, Bergek et al. 2008

(4) Einschätzung der Marktreife des TIS anhand der Dynamik der Funktionen; (5) Untersuchung von Anreiz- und Blockademechanismen (etwa durch etablierte Akteure und Technologien); (6) Ableitung von Handlungsempfehlungen aus den Schritten 1–5.

Obwohl die sieben Funktionen konzeptionell eine umfassende Charakterisierung eines TIS erlauben (s. Tab. 1), konzentrieren sich bisherige TIS-Analysen stark auf Untersuchungen zur Technologiegenese und damit auf die Funktionen 1 bis 3. Um die Komplexität und Dynamik größerer gesellschaftlicher Transformationsprozesse bei TIS-Analysen besser zu verstehen, bedarf es einer stärkeren Berücksichtigung des Nachfragesystems sowie politischer und weiterer Akteure aus dem Umfeld des TIS (Weber und Rohracher 2012). Dazu kann konzeptionell an die Funktionen 4 bis 7 angeknüpft werden (vgl. Abb. 1).

So spiegelt die Funktion 6 „Marktformierung“ das Nachfragesystem, d. h. den Stand der Technologiediffusion, wider. Der Einfluss von Akteuren aus dem TIS-Umfeld kann über die Funktion 7 „Legitimität“ abgebildet werden, d. h. der Wahrnehmung und Unterstützung des TIS durch diese externen Akteure. Den Funktionen 4 „Suchrichtung“ und 5 „Ressourcenmobilisierung“ kommt eine Brückenfunktion zwischen Technologiegenese und -diffusion zu: Je höher die Legitimität und je fortgeschrittener die Marktformierung eines TIS ist, desto leichter können Ressourcen zu dessen (technologischer) Weiterentwicklung mobilisiert werden. Die Suchrichtung spiegelt die inhaltliche Konsolidierung eines TIS wider und steht in Wechselbeziehung zu den übrigen Funktionen. So fördert z. B. eine Konvergenz der Zukunftsvorstellungen zu einem TIS dessen Legitimität. Ähnliches gilt auch für die Zusammenhänge zwischen der Suchrichtung und den übrigen Funktionen.

Die beiden folgenden Kapitel knüpfen an diese Überlegungen zu den Zusammenhängen zwischen den TIS-Funktionen an. Im Kapitel *Technologiegenese* wird das Agentenmodell SKIN (Simula-

ting Knowledge in Innovation Networks) vorgestellt. Hier wird erläutert, wie dieses Modell in Kombination mit empirischen Erhebungen zur Politikberatung mit Blick auf die Optimierung der drei Funktionen „Unternehmerisches Experimentieren“, „Entstehung von Wissen“ und „Diffusion von Wissen“ genutzt werden kann. Existierende Modelle zur Simulation der Technologiediffusion sind bisher techno-ökonomisch geprägt – Modelle zur Simulation von Akteursverhalten, müssen erst noch entwickelt werden. Daher befasst sich das Kapitel *Technologiediffusion* primär mit grundlegenden konzeptionellen Fragen zur Ausgestaltung eines solchen Akteursmodells und der Identifikation von Fragestellungen, zu deren Analyse sich das zu entwickelnde Akteursmodell in Kombination mit empirischen Erhebungen einsetzen lässt. Abschließend werden die Kernaussagen des Artikels zusammengefasst.

Technologiegenese

Ansätze zur Simulation der Funktionen

Um die zuvor dargestellten Funktionen bei der Technologiegenese simulieren zu können, wird das agentenbasierte Modell SKIN (Gilbert et al. 2010) herangezogen und um einige Funk-

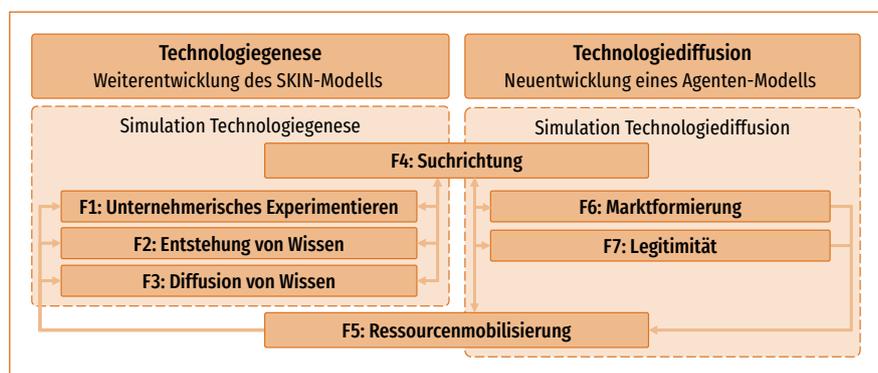


Abb. 1: Zusammenhänge TIS-Funktionen, Technologiegenese und Technologiediffusion.

Quelle: Eigene Darstellung

tionalitäten erweitert, um es konkreter auf Technologieinnovationsprozesse anzupassen (Droste-Franke und Fohr 2017). Dieses wird im Folgenden „erweitertes SKIN-Modell“ genannt.

Wissensgenese und -austausch sind zentrale Elemente von SKIN. In dem Modell interagieren Agenten mit heterogenen Eigenschaften in einer sich kontinuierlich verändernden Umgebung. Wissen kann entstehen aber auch vergessen werden und ein Produkt entsteht aus einer Kombination verschiedener Wissenskomponenten. Agenten im Modell sind vor allem Firmen und Forschungsinstitutionen, z. B. im Bereich der Entwicklung von Wärmepumpen. Firmen produzieren und verkaufen innova-

Die Kombination von empirischen Daten und ABM bietet mit Blick auf die Beratung zu möglichen Energiezukünften viele Vorteile.

tive Güter, wie Wärmepumpen oder deren Vorprodukte. Dazu verwenden sie eigenes Wissen aber auch Wissen anderer Agenten. Dies umfasst zum einen Wissen aus Forschung und Entwicklung, aber auch praktisches Wissen für eine effiziente Produktion. Zum anderen werden geeignete Vorprodukte als Inputs anderer Agenten oder Ressourcen benötigt. Durch eigene Forschung und Forschung in Forschungsprojekten erhalten Firmen neues Wissen. Produktion und Forschung erhöht zudem die Expertise in vorhandenem Wissen. So können Wärmepumpen z. B. durch den Einsatz neuer Materialien oder eines neuen Designs effizienter gestaltet werden. Forschungsinstitutionen vermehren so ihr Wissen und tauschen es u. a. mit Firmen als Projektpartnern aus. Die Produkte werden auf dem Markt angeboten. Findet eine Wärmepumpe oder ein Vorprodukt keinen Absatz, senkt die Firma den Preis, forscht weiter oder wechselt das Produkt.

Um die Auswirkungen von Maßnahmen auf Struktur und Dynamik von Innovationsnetzwerken zu analysieren, werden diese im Rahmen von Simulationsexperimenten in SKIN implementiert. Maßnahmen können dabei direkt darauf abzielen, bestimmte Funktionalitäten des TIS zu verbessern. Eine Maßnahme könnte z. B. sein, die Zusammenarbeit und Kommunikation entlang der Wertschöpfungskette (z. B. zwischen Wärmepumpenherstellern und den Zulieferern) zu verbessern und damit den Wissensaustausch zwischen den jeweiligen Akteuren zu verstärken. Die TIS-Analyse kann dabei die Struktur vorgeben, in deren Rahmen Daten erhoben und Funktionalitäten bzgl. folgender Fragen bewertet werden: Ist eine geeignete Unternehmenslandschaft vorhanden um Wissensentstehung zu gewährleisten? Welche Arten von Wissen entstehen und wie wird Wissen ausgetauscht? Welche Hürden bestehen und wie können diese überwunden werden?

Ansätze zur Verknüpfung von Empirie und Simulation

Grundsätzlich kommen quantitative und qualitative Methoden der empirischen Innovationsforschung zum Einsatz, um mit SKIN realitätsnahe Abbildungen der Innovationsgenese zu ermöglichen. Einige empirisch erhobene Daten können direkt im Modell verwendet werden, z. B. empirische Ergebnisse zur Abstrahierung von Agenten und ihrer Umwelt, etwa indem die Anzahl von Patenten verschiedener Unternehmensklassen als Indikator für F&E-Tätigkeiten mittels Patentanalyse zu Wärmepumpen erhoben werden. Solche Unternehmensklassen (z. B. nach Firmen-Größen, Wirtschaftssektor, etc.) können dann als unterschiedliche Agententypen im Modell abgebildet werden. Informationen zur realen Zusammensetzung der Akteure eines TIS können aus Unternehmensstatistiken/-datenbanken gewonnen werden.

Zusätzlich zur Kalibrierung auf Mikroebene werden quantitative empirische Daten auf Meso- bzw. Makroebene herangezogen, mit denen sich die Ergebnisse der Modellierung vergleichen lassen. Durch Reproduktion beobachteter Strukturen in Innovationsnetzwerken, die sich etwa in beobachteten Forschungs- und Patentnetzwerken widerspiegeln, lässt sich die Validität des Modellierungsansatzes überprüfen.

Neben Ergebnissen aus quantitativen empirischen Analysen liefern auch qualitative Erhebungen wertvolle Informationen. Z. B. können in Interviews oder Workshops mit Wissenschaftler*innen und Praxisakteuren (1) die Funktionsmuster bei der Technologiegenese identifiziert, (2) die bisherige Funktionserfüllung bewertet, (3) Fragen an das Modell formuliert und (4) Modellergebnisse zur Ableitung von Handlungsempfehlungen diskutiert werden.

Tabelle 2 gibt einen Überblick über die Funktionen, die für die Technologiegenese besonders relevant sind sowie über Indikatoren und geeignete Datenquellen für empirische Erhebungen.

Im Modell sind des Weiteren allgemeinere Erkenntnisse über die Eigenschaften, Verhaltensweisen und strukturellen Rahmenbedingungen der handelnden Akteure abgebildet. Aus Studien ist beispielsweise bekannt, dass anwendbares Wissen je nach Kontext unterschiedlich intensiv ausgetauscht wird oder dass man Vorwissen in der Firma oder im Institut benötigt, etwa eine/n studierten Elektrotechniker*in, um bestimmtes Wissen aufnehmen und verwerten zu können. Auch die anderen Funktionen des TIS (s. u.) gehen u. a. so als Rahmenbedingungen ein.

Simulationsexperimente mit SKIN zur Beratung

Verschiedene Simulationsexperimente können mit dem Ziel der Beratung von (politischen) Entscheidungsträgern durchgeführt werden:

1. „Unternehmerisches Experimentieren“ ist im erweiterten SKIN durch Anwenden von Wissen zur Produktion von Gütern und durch die Gründung neuer Firmen auf verschiedene Weisen abgebildet. Der Erfolg wird durch die Erwirtschaftung von Erlösen abgebildet. Durch Simulationsexperimente können die Auswirkungen auf das Innovationssystem von Änderungen der Rahmenbedingungen für diese Aktivitäten

TIS-Funktion	Indikatoren/Event-/Ereignistypen	Daten/Datentypen, Quellen (Auswahl)
Unternehmerisches Experimentieren	Anzahl Akteure, Anzahl Unternehmen, Anzahl Entrepreneur, neue Sparten etablierter Anbieter, Spezialisierung entlang der Wertschöpfungskette	Unternehmens-, Branchenstatistik(en)
Entstehung von Wissen	Anzahl Patente, Publikationen, F & E-Projekte, Forschungsintensität(en); Lernkurven	Patent- und F & E-Statistiken (EPO PatStat, Förderkatalog, Wissenschaftsstatistik)
Diffusion von Wissen	Netzwerkgröße und -dichte, gemeinsame F & E-Projekte, gemeinsam gehaltene Patente, Zitationen, Workshops, Messen, Konferenzen	Patent- und F & E-Statistiken, Mitglieder Branchenverbände, Teilnehmer Konferenzen und Workshops
Suchrichtung	Anzahl und Gewicht wissenschaftlicher und journalistischer Publikationen, Zielsetzungen, Regierungs- oder Förderprogramme	H-Index von Publikationen, Patenten, Themen von Forschungsprogrammen

Tab. 2: TIS-Funktionen und empirische Belege.

Quelle: Eigene Darstellung basierend auf Wiczorek et al. 2013, Hekkert et al. 2007

getestet werden, z. B. Zahl neuer Produkte bzw. Zahl von Start-ups verschiedener Typen.

2. „Die Entstehung von Wissen“ erfolgt im erweiterten SKIN durch Forschung und neue Akteure. Die Abbildung erfolgt durch einen evolutionären Prozess. Dem Wissen eines Akteurs ist immer auch eine Expertise zugewiesen. Diese erhöht sich für Wissen, das zur Produktion eingesetzt wird mit der Zahl der Produktionszyklen und bei Wissen, das in Projekte einfließt, mit seiner Verwendung in den Projekten. Entsprechend können mit dem Modell Auswirkungen von Änderungen in Rahmenbedingungen für unternehmerische und wissenschaftliche Forschung untersucht werden, die sich z. B. durch Schwerpunkte von Forschungsprogrammen ergeben.
3. Wissensaustausch zwischen den Akteuren erfolgt im erweiterten SKIN im Rahmen von bilateralen Zusammenarbeiten bei der Produktion, in Produktionsnetzwerken und bei Zusammenarbeiten in Forschungsprojekten. Dabei werden praktisches und wissenschaftliches Wissen unterschieden, Unterschiede in der Aufnahmemöglichkeit von Wissen abhängig vom Vorwissen berücksichtigt und Zuwachs von Expertise in verschiedenen Wissensbereichen modelliert, abhängig von der Menge des erhaltenen Wissens. Mit dem Modell können unter anderem Auswirkungen von Maßnahmen (wie spezifische Anreize zur Zusammenarbeit, Etablierung von Firmennetzwerken, Etablierung neuer Akteure mit entsprechenden Aufgaben und Veranstaltungsformaten, z. B. Energieagenturen) simuliert werden, die die Intensität des Wissensaustausches zwischen verschiedenen Akteuren (z. B. entlang/quer zur Wertschöpfungskette) oder die Erhöhung der Aufnahmefähigkeiten fördern.
4. Anleitung zur Suche ist im Modell nicht detailliert abgebildet, sondern durch Rahmenbedingungen vorgegeben. Eine Veränderung der Rahmenbedingungen, wie z. B. eine spezifischere Ausrichtung von Projektausschreibungen auf konkrete Wissensbereiche, führt über die Modelldynamik zu anderem Wissen, anderen Strukturen und Dynamiken. Auch Auswirkungen marktlicher Anreize über Nachfrage- oder Entwicklungs- und Produktionsförderung können im Modell simuliert werden.

Technologiediffusion

Für Analysen zur Technologiediffusion sind derzeit noch keine dem SKIN-Modell vergleichbaren Simulationstools vorhanden. Daher werden nachfolgend zunächst grundlegende konzeptionelle Aspekte der Frage adressiert, welche Aktivitäten von welchen Akteuren in Simulationstools zur Technologiediffusion abgebildet werden sollten, um einen Mehrwert bei der Politikberatung zu erbringen.

Konzeptionelle Grundlage von Diffusionsanalysen

Die Marktformierung in einem TIS kann als Ausdruck der Technologiediffusion betrachtet werden und Legitimität bildet für letztere eine zentrale Voraussetzung. Die Dynamik beider Funktionen hängt stark von Entscheidungen individueller Akteure ab: Konsument*innen treffen Kaufentscheidungen, in Unternehmen bedürfen neue Technologien der Unterstützung von sog. Innovation Champions (Globisch et al. 2018) und bei Politikmaßnahmen stellt sich die Frage nach der Akzeptanz von Bürger*innen sowie Betroffenen. Daher scheint eine Verbindung von TIS-Analyse und Akzeptanzforschung, die konzeptionell stärker auf die Analyse von individuellen Entscheidungen abzielt, sinnvoll. Hinsichtlich individueller Akteure können in Anlehnung an Wüstenhagen et al. (2007) drei Akzeptanzformen unterschieden werden (Bezug zu Abb. 2 jeweils in Klammern):

1. *Sozio-politische Akzeptanz (I.):* Die allg. Befürwortung oder Ablehnung von Technologien (z. B. Wärmepumpen) und Politikmaßnahmen (z. B. Verbote konventioneller Heizungen) durch die Wähler*innen.
2. *Marktakzeptanz (II.):* Die Adoption einer Technologie durch Entscheider*innen in Haushalten und Unternehmen als Nachfrager oder Investoren (z. B. Entscheidung für/gegen den Einbau einer Wärmepumpe).
3. *Lokale Akzeptanz (III.):* Die Reaktion von vor Ort konkret Betroffenen auf die Umsetzung von Adoptionsentscheidungen (z. B. Mieter*innen) und Politikmaßnahmen (z. B. Bauleitungen).

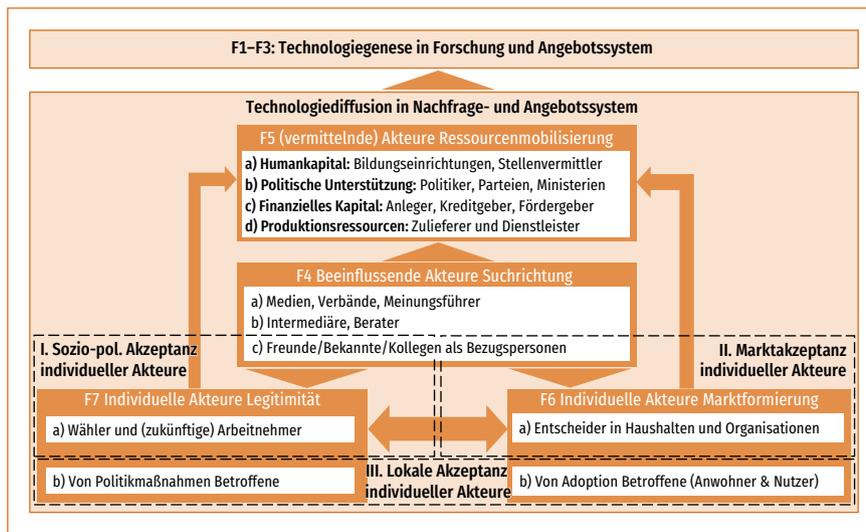


Abb.2: Technologiediffusion in Nachfrage- und Angebotssystem; Abweichungen zu Abb.1 ergeben sich aus dem primären Fokus auf individuelle Akteure.

Quelle: Eigene Darstellung in Anlehnung an Dütschke et al. 2019

Fragestellungen an Diffusionsanalysen

Ein Fokus auf individuelle Akteure führt zu einer entsprechenden Perspektive auf die Entstehung von Legitimität und Marktformierung, aus der sich unter anderem folgende Fragestellungen ergeben:

Entstehung Legitimität (F7): Unter welchen Voraussetzungen kann sich ein entstehendes TIS als förderungswürdige Alternative zu einem bestehenden TIS legitimieren, obwohl evtl. Nachteile hinsichtlich Kosten, Komfort, o. ä. bestehen (z. B. Wahrnehmung von Wärmepumpen als sinnvolles Element der Wärmewende; F7 a)? Welchen Einfluss hat die Legitimität auf die lokale Akzeptanz von Fördermaßnahmen für ein TIS (z. B. Akzeptanz von Vorschriften zur Heiztechnologie in Bebauungsplänen; F7 b)?

Dynamik Marktformierung (F6): Welchen Beitrag können Modelle zu Adopter-Gruppen (Rogers 2003) und psychologische Theorien zu individuellen (Adoptions-)Entscheidungen zu einem beratungsorientierten Verständnis der Marktformierung leisten (z. B. Einflussfaktoren auf Beschaffung von Wärmepumpen; F6a)? Inwieweit sind Dritte von Adoptionsentscheidungen betroffen und spielen dadurch als Akteur*innen bei der Marktformierung eine Rolle (z. B. Akzeptanz von Umlage der Investitionskosten für eine neue Wärmepumpe durch die Mieter*innen; F6 b)?

Einfluss Suchrichtung (F4): Welchen Einfluss hat das persönliche Umfeld auf die Meinung von Bürger*innen (z. B. Einfluss von Meinungsführer*innen auf wahrgenommene Legitimität von Wärmepumpen ggü. anderen Heiztechnologien; F4 c → F7 a) und potenziellen Adoptern (Einfluss von Bekannten auf wahrgenommene Attraktivität von Wärmepumpen ggü. anderen Heiztechnologien; F4 c → F6a)? Welchen Einfluss haben gesellschaftliche Akteure und Intermediäre auf die Entstehung

von Legitimität (F4 a/b → F7) und Adoptionsentscheidungen (F4 a/b → F6)?

Mit Blick auf die *Ressourcenmobilisierung* zur Unterstützung der Technologiegenese (F4 → F1–F3) lassen sich weitere Fragestellungen zum Einfluss individueller Akteure auf vermittelnde Akteure ableiten; z. B. welchen Einfluss hat die Legitimität eines TIS auf Studien- und Ausbildungsentscheidungen und die Ausgestaltung von Lehrplänen (z. B. Attraktivität von Bauingenieurs-Studiengängen mit Fokus auf Wärmepumpen/alternative Heiztechnologien; F7 a → F5 a)? Wie hängt die Legitimität eines TIS aus Sicht von Bürgern und Betroffenen mit der Positionierung von politischen Akteuren zusammen (F7 a/b → F5 b)? Inwieweit werden Entscheider bei potenziellen Kapitalgebern, Zulieferern und Dienstleistern in ihrer Wahrnehmung der TIS-Entwicklung auch durch persönliche Erfahrungen

mit einer Technologie (F6 → F5 c/d) oder persönliche Werte und Einstellungen (F7 → F5 c/d) beeinflusst?

Mögliche empirische Grundlagen zur Simulation der Technologiediffusion

Für die Untersuchung dieser Fragen können qualitative und quantitative Primärdaten erhoben werden. Weiterhin können auch Prozessdaten nützliche Datenquellen sein. So können bspw. Social-Media-Beiträge Einblicke in die Entstehung und Diffusion von Meinungen und Einstellungen erlauben. Darüber hinaus kann auch die Analyse von Medien-Berichten, Pressemitteilungen oder Parlamentsprotokollen u. ä. für die Identifikation und Positionsbestimmung der beeinflussenden gesellschaftlichen Akteure nützlich sein (Tab. 3). Solche Analysen können wiederum Ausgangspunkt für die Untersuchung des Einflusses dieser Akteure auf individuelle Einstellungen und Entscheidungen sein, die die Grundlage von Legitimität und Marktformierung bilden.

Zur Analyse der empirischen Daten können verschiedene Verfahren verwendet werden, die die Untersuchung unterschiedlicher Teilaspekte der genannten Forschungsfragen erlauben. Beispielhaft seien hier vier Verfahren genannt: (1) Strukturgleichungsmodelle zur Analyse des Zusammenspiels (psychologischer) Eigenschaften von Individuen und deren Einfluss auf die Akzeptanz von Maßnahmen und Technologien; (2) Choice- und Vignetten-Experimente zur Analyse des Einflusses der Eigenschaften von Technologien oder Maßnahmen auf deren Akzeptanz; (3) Clusteranalytische Verfahren zur Identifikation von Subgruppen (z. B. bei den Ergebnissen der zuvor genannten Verfahren); (4) (Egozentrische) Netzwerkanalysen zur Untersuchung der Struktur von interpersonellen Netzwerke und ihres Einflusses auf Einstellungen und Entscheidungen.

TIS-Funktion	Indikatoren/Event/Ereignistypen	Daten/Datentypen/Quellen (Auswahl)
Suchrichtung	Positionierung beeinflussender Akteure zu TIS Mobilisierungsfähigkeit beeinflussender Akteure bzgl. TIS	<ul style="list-style-type: none"> • Bei Analysen zu beeinflussenden und vermittelnden (kollektiven) Akteuren: Text- und Social-Discourse-Analyse von/mit Medienberichten, Parlamentsprotokollen, Pressemitteilungen u. Ä. • Qualitative Interviews, Gruppendiskussionen und (Experten-)Workshops • Quantitative Quer- und Längsschnittbefragungen (Auswertung z. B. mit u. g. Analysemethoden 1–4) • Analyse von Inhalt und Zusammenhängen von Social-Media-Beiträgen
Ressourcenmobilisierung	<p><i>Politische Unterstützung:</i> Positionierung politischer Akteure im gesellschaftlichen Diskurs zum TIS</p> <p><i>Humankapital:</i> Attraktivität des TIS für Arbeitnehmer*innen; TIS-bezogene Bildungsangebote</p> <p><i>Finanzielles Kapital und Produktionsmittel:</i> Attraktivität des TIS als Geschäftsfeld</p>	
Marktformierung	<p><i>Marktakzeptanz:</i> (Intention zu) Technologieadoption</p> <p><i>Lokale Akzeptanz:</i> Akzeptanz der Technologieadoption durch Betroffene</p>	
Legitimität	<p><i>Sozio-politische Akzeptanz:</i> Positive Einstellung der Bürger*innen zu Technologie/TIS</p> <p><i>Lokale Akzeptanz:</i> Akzeptanz von Politikmaßnahmen durch Betroffene</p>	

Tab. 3: TIS-Funktionen und empirische Belege.

Quelle: Eigene Darstellung

Verbindung von Empirie und Simulation

Der Einsatz von ABM in Verbindung mit empirischen Analysen zur Untersuchung der genannten Forschungsfragen bietet sich v. a. aus zwei Gründen an:

1. Mit Blick auf die Beratung von (politischen) Entscheider*innen bietet der Einsatz von ABM vor allem den Vorteil, dass Szenarien zu möglichen Zukünften unter verschiedenen Annahmen simuliert und dadurch veranschaulicht werden können.
2. Im Rahmen einzelner empirischer Untersuchungen können stets nur Teilaspekte der Technologiediffusion adressiert werden. Durch den Einsatz von ABM können die Ergebnisse verschiedener empirischer Analysen zusammengeführt und so die Komplexität der Technologiediffusion besser berücksichtigt werden.

Damit eine Verbindung unterschiedlicher empirischer Untersuchungen mittels ABM gelingen kann, sind aber insbesondere zwei Herausforderungen zu bewältigen: (1) Damit Ergebnisse empirischer Analysen passfähig zur Struktur und Funk-

nicht möglich. Daher bedarf es der (empirischen) Identifikation oder (zweckmäßigen) Definition von Subgruppen, über die die empirischen Ergebnisse unterschiedlicher Erhebungen den Agenten einer ABM zugeordnet werden können.

Zusammenfassung und Schlussfolgerungen

Aus den vorherigen Kapiteln wird deutlich, dass die Kombination von empirischen Daten und ABM mit Blick auf die Beratung zu möglichen Energiezukünften viele Vorteile bietet. ABM erlaubt die Simulation von Vorgängen in und zwischen Akteuren auf der Mikroebene und die Aggregation der Folgen dieser Vorgänge auf die Makroebenen. Durch die Simulation auf der Mikroebene kann die Beratung zu Politikmaßnahmen die (Heterogenität der) Entscheidungsprozesse von Adressaten und Stakeholdern berücksichtigen. Zugleich sind mittels Wenn-dann-Analysen Aussagen zu möglichen Folgewirkungen von unterschiedlich ausgeformten Politikmaßnahmen auf der Makroebene möglich. Darüber hinaus bietet die Simulation der

ABM erlaubt die Simulation von Vorgängen in und zwischen Akteuren auf der Mikroebene und die Aggregation der Folgen dieser Vorgänge auf die Makroebenen.

tionsweise einer ABM sind, sollten sich beide inhaltlich an den gleichen theoretischen Modellen orientieren. Dafür bedarf es möglichst universell anwendbarer theoretischer Modelle bzw. Meta-Modelle, die unterschiedliche theoretische Modelle miteinander verbinden. (2) Da in unterschiedlichen empirischen Untersuchungen auch unterschiedliche Personen befragt werden, ist eine Zusammenführung der Daten auf individueller Ebene

Interaktion zwischen verschiedenen Akteuren die Möglichkeit, auch nicht-intendierte Folgen einer Maßnahme zu erkennen, die sich aus zuvor nicht bedachten Reaktionen und Rückkopplungseffekten ergeben können.

Mit Blick auf die Kombination von Empirie und Simulation wurde gezeigt, wie verschiedene qualitative und quantitative Datenquellen (Tab. 2) zur Validierung und Kalibrierung des

SKIN-Modells genutzt werden können, um robuste Systemanalysen zur Politikberatung zu ermöglichen. Zudem erlaubt die empirische Fundierung eine Simulation möglicher Entwicklungsverläufe, die einige Jahre in die Zukunft reichen. Durch die Berücksichtigung der Technologiediffusion und des gesellschaftlichen Umfelds eines TIS kann die Aussagekraft von (Simulations-)Ergebnissen zu möglichen Zukünften gesteigert werden. Auch hier bietet sich eine Kombination von Empirie und ABM als methodischer Ansatz zur Politikberatung an. Im Zusammenhang mit der Analyse der Technologiediffusion sind die Entscheidungen individueller Akteure von besonderer Bedeutung, da sie der Entstehung von Legitimität, der Dynamik der Markformierung und der Mobilisierung wichtiger Ressourcen zugrunde liegen.

Die Verknüpfung beider Modelle und damit die Abbildung aller Funktionen des TIS stellt eine vielversprechende Möglichkeit dar, ein Innovationssystem in seiner Komplexität besser zu modellieren und zu untersuchen. Der Bedarf solcher kombinierten Analysen ergibt sich daraus, dass das Gelingen der Energiewende sowohl von der Dynamik technologischer Entwicklungen als auch von deren Akzeptanz abhängt.

Literatur

- Bergek, Anna; Jacobsson, Staffan; Carlsson, Bo; Lindmark, Sven; Rickne, Annika (2008): Analyzing the functional dynamics of technological innovation systems. A scheme of analysis. In: *Research Policy* 37 (3), S. 407–429.
- Dütschke, Elisabeth; Bögel, Paula; Choi, Su-Min; Globisch, Joachim; Burghard, Uta (2019): Soziale Akzeptanz als erweitertes Verständnis des Akzeptanzbegriffs. Eine Bestimmung der Akteure für den Prozess der Energiewende. In: *Akzeptanz und politische Partizipation in der Energietransformation*. Wiesbaden: Springer VS, S. 211–230.
- Droste-Franke, Bert; Fohr, Gabriele (2017): Simulating innovation of key technologies in German energy transition. *Social Simulation Conference (SSC)*. Dublin, Irland, 25–29. 09. 2017.
- Gilbert, Nigel; Ahrweiler, Petra; Pyka, Andreas (2010): The SKIN (Simulating Knowledge Dynamics in Innovation Networks) model. University of Surrey, University College Dublin, University of Hohenheim, <https://github.com/InnovationNetworks/skin>, zuletzt geprüft am 23. 10. 2019.
- Globisch, Joachim; Dütschke, Elisabeth; Wietschel, Martin (2018): Adoption of electric vehicles in commercial fleets. Why do car pool managers campaign for BEV procurement? In: *Transportation Research Part D: Transport and Environment* 64, S. 122–133.
- Hekkert, Marko; Negro, Simona (2011): Understanding technological change. Explanation of different perspectives on innovation and technological change. Utrecht University. Online verfügbar unter <https://pdfs.semanticscholar.org/34c9/22f3580c98c2ccf50818a70525652fd3b5e.pdf>, zuletzt geprüft am 21. 10. 2019.
- Hekkert, Marko; Suurs, Roald; Negro, Simona; Kuhlmann, Stefan; Smits, Ruud (2007): Functions of innovation systems. A new approach for analysing technological change. In: *Technological Forecasting & Social Change* 74 (4), S. 413–432.
- Suurs, Roald (2009): *Motors of sustainable innovation. Towards a theory on the dynamics of technological innovation systems*. Dissertation Utrecht University.

- Weber, Matthias; Rohracher, Harald (2012): Legitimizing research, technology and innovation policies for transformative change. In: *Research Policy* 41 (6), S. 1037–1047.
- Wieczorek, Anna; Negro, Simona; Harmsen, Robert; Heimeriks, Gaston; Luo, Lin; Hekkert, Marko (2013): A review of the European offshore wind innovation system. In: *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 26, S. 294–306.
- Wüstenhagen, Rolf; Wolsink, Maarten; Bürer, Mary (2007): Social acceptance of renewable energy innovation. An introduction to the concept. In: *Energy Policy* 35, S. 2683–2691.



DR. JOACHIM GLOBISCH

forscht seit 2012 am Fraunhofer ISI zur Akzeptanz von Energietechnologien. Sein methodischer Schwerpunkt liegt auf quantitativen empirischen Untersuchungen und der Verbindung von Empirie und Modellierung.



DR. BERT DROSTE-FRANKE

ist Head of Department Energy beim IQIB. Seine Schwerpunkte sind System-, Innovations- und Technikfolgenanalysen zur Entscheidungsunterstützung auf Basis theoretischer Arbeiten, inter-/transdisziplinärer Expertengruppen, quantitativen Analysen und Modellierungen.



GABRIELE FOHR

ist wissenschaftliche Mitarbeiterin im Department Energy des IQIB. Ihr Hauptarbeitsfeld liegt in der Methodenentwicklung, vor allem für die Energiesystemanalyse, sowie in der Resilienzforschung.



SANDRA WASSERMANN

ist bei ZIRIUS, Universität Stuttgart beschäftigt. Seit 2016 ist sie dort Sprecherin des Forschungsbereichs Energie. Ihr Forschungsinteresse gilt der Analyse von technologischen und sozialen Innovationen im Zuge der Energiewende.

A.1.2 Meilenstein-Dokument 1-3: Veröffentlichter Journal Article: „Integrating Methods and Empirical Findings from Social and Behavioural Sciences into Energy System Models - Motivation and Possible Approaches“ (Senkpiel et al., 2020)

Article

Integrating Methods and Empirical Findings from Social and Behavioural Sciences into Energy System Models—Motivation and Possible Approaches

Charlotte Senkpiel ^{1,*}, Audrey Dobbins ², Christina Kockel ³, Jan Steinbach ⁴, Ulrich Fahl ², Farina Wille ⁵, Joachim Globisch ⁶, Sandra Wassermann ⁷, Bert Droste-Franke ⁸, Wolfgang Hauser ⁷, Claudia Hofer ², Lars Nolting ³ and Christiane Bernath ⁶

¹ Fraunhofer Institute of Solar Energy Systems, 79110 Freiburg, Germany

² Institute of Energy Economics and Rational Energy Use, University of Stuttgart, 70174 Stuttgart, Germany; audrey.dobbins@ier.uni-stuttgart.de (A.D.); ulrich.fahl@ier.uni-stuttgart.de (U.F.); claudia.hofer@ier.uni-stuttgart.de (C.H.)

³ Institute for Future Energy Consumer Needs and Behavior (FCN), RWTH Aachen University, 52074 Aachen, Germany; christina.kockel@eonerc.rwth-aachen.de (C.K.); lnolting@eonerc.rwth-aachen.de (L.N.)

⁴ IREES—Institute for Resource Efficiency and Energy Strategies, 76131 Karlsruhe, Germany; j.steinbach@irees.de

⁵ Institute of Psychology, Division of Research Methods and Biopsychology, Technical University Braunschweig, 38106 Braunschweig, Germany; farina.wille@tu-braunschweig.de

⁶ Fraunhofer Institute for Systems and Innovation Research, 76139 Karlsruhe, Germany; Joachim.globisch@isi.fraunhofer.de (J.G.); christiane.bernath@isi.fraunhofer.de (C.B.)

⁷ ZIRIUS—Center for Interdisciplinary Risk and Innovation Studies at the University of Stuttgart, 70174 Stuttgart, Germany; sandra.wassermann@zirius.uni-stuttgart.de (S.W.); wolfgang.hauser@zirius.uni-stuttgart.de (W.H.)

⁸ IQIB—Institute for Qualifying Innovation Research and Consulting, 53474 Bad Neuenahr-Ahrweiler, Germany; bert.droste-franke@iqib.de

* Correspondence: charlotte.senkpiel@ise.fraunhofer.de

Received: 7 July 2020; Accepted: 26 August 2020; Published: 21 September 2020



Abstract: The transformation of the energy system is a highly complex process involving many dimensions. Energy system models help to understand the process and to define either target systems or policy measures. Insights derived from the social sciences are not sufficiently represented in energy system models, but address crucial aspects of the transformation process. It is, therefore, necessary to develop approaches to integrate results from social science studies into energy system models. Hence, as a result of an interdisciplinary discourse among energy system modellers, social scientists, psychologists, economists and political scientists, this article explains which aspects should be considered in the models, how the respective results can be collected and which aspects of integration into energy system models are conceivable to provide an overview for other modellers. As a result of the discourse, five facets are examined: Investment behaviour (market acceptance), user behaviour, local acceptance, technology innovation and socio-political acceptance. Finally, an approach is presented that introduces a compound of energy system models (with a focus on the macro and micro-perspective) as well as submodels on technology genesis and socio-political acceptance, which serves to gain a more fundamental knowledge of the transformation process.

Keywords: energy system modelling; social science; system optimisation; energy transition; investment behaviour; local acceptance; socio-political acceptance; technology genesis; user behaviour

1. Introduction

The need for a transformation of the energy system due to climate change led to the development of more models that provide insights and solutions for future energy systems concerning climate policy, the security of supply and economic developments [1]. Energy system models (ESM), which cover the entire energy system including the sectors for energy production, buildings, transport and industry from a techno-economic perspective, provide decision support [2]. Recently, the number of different energy and electricity market models has grown significantly. Ref. [3] gives an overview of 75 different models (with a focus on the electricity sector) in the current modelling landscape, which illustrates the central role ESM already play. Ref. [1] identifies the four main challenges of ESM being the computing time, uncertainty and transparency, growing complexity and integrating human behaviour, social risks and opportunities in ESM. Although [4] emphasises that energy transitions are a combination of technical, social and political factors, the field of social science is greatly underrepresented in energy system modelling [5–7]. Possible transformations of the energy system are mainly considered from a techno-economic perspective. To date, social factors have largely been neglected in ESM, thereby limiting the insights derived and, as such, the integration of social and behavioural factors would vastly improve the overarching messaging from ESM.

However, which specific aspects to include and how this can be done is not always straight-forward. Individual approaches, for example, exist that are focussed on the integration of acceptance into ESM [8,9]. Existing approaches concerning different aspects of social and behavioural factors are presented based on the literature review. Based on already existing approaches, this article aims to provide a more generalised overview, to highlight which aspects of social science should be considered in ESM, which methods are suitable for this purpose and how these could be integrated. Furthermore, we will demonstrate how the coupling of different models can lead to a deeper understanding of the energy system interrelationships when taking social factors into account. The article reflects the results of an interdisciplinary discourse of scientists from the social science, psychology, economics, political science and energy system modelling disciplines and thus aims to support other energy system modellers on how to consider social science findings and methods in future work.

Figure 1 gives an overview of the article structure. In the following sections, we categorise and briefly describe ESMs from the macro and micro-perspectives. The extent of the integration of social science factors into these models is reviewed in the literature in Section 2. In Section 3, two socio-scientific agent-based models are presented, which represent the aspect of technology genesis on the one hand and socio-political acceptance on the other. Section 4 collates which factors should be taken into account in ESM from a social science perspective, and how they can be analysed and integrated into ESM at the macro and micro level. The different model categories answer different questions, but together they provide an even more fundamental understanding of the systemic relationships and complement each other well. Section 5, therefore, shows how the models of the different categories can be coupled. In Section 6, we summarise and discuss the main conclusions of the previous sections.

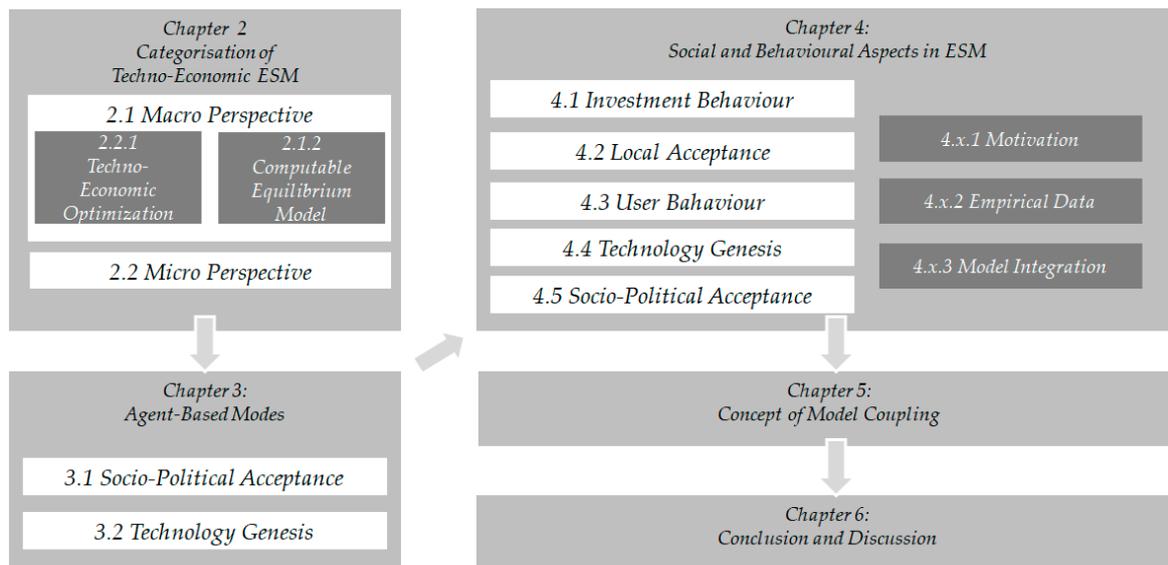


Figure 1. Overview of the article structure.

2. Categorisation of Techno-Economic Energy System Models

ESM answer different questions and therefore use different methods. Reviews of ESM can be found, for example, in [1,3,10–14], where, in addition to a categorisation of ESM, criteria for differentiating the models are listed. Ref. [1] (p. 4) divides the landscape of ESM into four categories: “1. models covering the entire energy system, primarily using optimisation methods, with the primary aim of providing scenarios of how the system could evolve, 2. models covering the entire energy system, primarily using simulation techniques, with the primary purpose of providing forecasts of how the system may evolve, 3. models focused exclusively on the electricity system, ranging in methods and intentions from optimisation/scenarios to simulation/prediction, 4. scenarios relying on more qualitative or mixed methods rather than detailed mathematical models.” For this article, the first two categories will be considered, since the need for integration of social science factors is particularly great here.

According to Ref. [15], the model landscape can be divided into top-down (economy-wide perspective; limited representation of the energy system), bottom-up (detailed representation of the energy system) and hybrid models (those that include the energy sector as a module), among which different methods (e.g., econometric, optimisation) are used. The distinction between bottom-up and top-down approaches is less conceptual and based more on the different sectoral and technological levels of detail [16]. The ESMs considered in this article are bottom-up models that consider the energy system in great detail.

In this article, the authors show why and how social science factors can be integrated into different types of ESM. For this purpose, an additional dimension is considered (micro and macro-perspective). The macro models examine the entire energy system in an aggregated form, while the micro models represent actions and decisions from the point-of-view of a specific sector or actors. For the category of macro models, both energy system optimisation (ESOM) (Section 2.1.1) and Computable General Equilibrium (CGE) models (Section 2.1.2) are described. In the micro-perspective, optimisation and simulation approaches are presented (Section 2.2). For each model category, the aim of the model, typical input and output data and representatives of the model are illustrated. Previous approaches to integrating empirical social science data into the models are shown in Section 2.3.

2.1. Techno-Economic Energy System Models from a Macro-Perspective

ESM with a macro-perspective depict the entire energy system, often including all sectors in great technical detail and consider both the operation and expansion of technologies in an aggregated form. They differ from models with a micro-perspective in that no individual decisions are represented, but the

system (e.g., the whole of Germany) perspective is taken into account. ESMs with a macro-perspective can be divided into optimisation models and CGE models, which are described in the following two sections.

2.1.1. Energy System Optimisation Models

Energy system optimisation models (ESOM) depict the components of the energy system through technical and economic parameters. They usually make use of mathematical optimisation, whereby the costs for the operation and expansion of the system are minimised.

Model target: generation of a cost-optimal system composition under specified boundary conditions, such as a specified CO₂ reduction target. The technology expansion, the technology operation and the systemic interrelationship of the technologies are considered. Conversion technologies (electricity, heat and hydrogen), storage, imports and exports, as well as transmission networks, are considered. These can be applied to explore as examples the following questions: “Which system configuration enables a reduction in greenhouse gases by 95% by 2050 compared to 1990?”, or “What effects will the transport sector have if the residential buildings are renovated?”.

Typical input: electricity and heating demand, technology stocks, technology potential, techno-economic technology parameters, weather data, generation curves and energy source prices.

Output: technology expansion, technology operation, total system costs, CO₂ emissions.

Models: example representatives of the model category are: TIMES [17], REMod [18], ENERTILE [19], OSeMOSYS [20], Calliope [21] or MARKAL [22].

2.1.2. Computable General Equilibrium Model

A market equilibrium model or Computable General Equilibrium (CGE) model [23–26] focuses on the entire economic system and, especially, on the interrelations between sectors and countries [23]. CGE models are based on the neoclassical theory of general equilibrium, which consists of three equilibrium conditions, namely the zero-profit condition (no firm profits due to perfect competition), the market clearance condition (demand equals supply if prices are positive) and the budget constraint condition (household income must equal household expenses). Those equilibrium conditions are then combined with assumptions on agent behaviour and preferences (consumers and producers), mathematically formulated as a mixed complementarity problem and solved, such that a general equilibrium on all markets is identified. Technical details within the energy sectors are typically not considered; however, a hybrid approach allows the addition of some technical disaggregation.

The economic interrelations in a CGE model are represented through a circular flow of monetary units, where production factors are utilised for producing firms’ output. From the provision of capital and labour, the consumers receive a money value (wage and return on capital), which they can either spend on the consumption of produced goods or invest. Investments increase the capital endowment in the subsequent period and, hence, increase production possibilities in the future. The government influences the optimal distribution of resources through taxes and benefits.

Mathematically, this circular economy is represented through production functions (profit maximisation of firms) and utility functions (utility maximisation of households). While the specification of different production functions allows the consideration of several technology options, technological changes and, hence, innovation, the specification of heterogeneous preferences captured in the utility functions enables the modeller to depict certain aspects of consumer behaviour.

Model target: cost-effectiveness analysis of energy and climate policy instruments considering the entire economic system.

Typical input: population growth, economic data for the base year (e.g., on production factors, technology efficiencies, etc.), development of CO₂ emissions.

Output: development of Gross Domestic Output (GDP), employment, international competitiveness, CO₂ prices, electricity generation, etc.

Models: example representatives of the model category are: DART [27,28], EMEC [29,30], GEM-E3 [31], IMACLIM-R [32], NEWAGE [33], PACE [34], SNOW-NO [35,36].

2.2. Techno-Economic Energy System Models from a Micro-Perspective

ESMs applied from the micro-perspective include a detailed technological representation of the system on individual aspects and incorporate, for example, investment behaviour. These models are often used to provide a rational basis for decisions on energy policy decisions and therefore act as decision support. These types of models operate either based on exploring the impact of specific policies on a particular energy demand sector (such as buildings, households, industry), or pathways to achieve certain objectives. Energy system models following a micro-perspective can be distinguished according to the underlying modelling approach that determines the type of dynamic representation of technology diffusion and energy demand development over time [37]. Thus, bottom-up energy system models can be categorised into simulation, optimisation and accounting models. Simulation models represent energy demand and energy supply descriptively [38], taking into account microeconomic decision-making and different drivers of technological diffusion. Accordingly, the design of simulation models aims at reproducing a given system—e.g., the building sector—and studying its development and transformation in the real world under different exogenous scenario variables. Optimisation models designed for representing a micro-perspective are based on the same framework as optimisation models on the macro-perspective described in Section 2.1.1. In contrast to simulation models, it follows a prescriptive approach. The goal is to derive different cost-optimal system states considering different market conditions and specific policy objectives. Applied on the micro-perspective, optimisation models can also be described as decentralised optimisation, which minimises the costs or maximises the utility of certain actors by focussing on the specific drivers for investment and consumption of the specific sector in question. The development of energy demands and technology uptake rates derived from simulation models can also be integrated as upper or lower boundaries for modelling technology diffusion with optimisation models. Therewith, a cost-effective pathway for a specific technology within the expected range of market uptake can be assessed. Accounting represents the third modelling approach in this category. The main difference between optimisation and simulation models is the exogenous choice of technology and market shares by the modelled user. Since technology diffusion is not explicitly modelled, accounting models are not within the scope of this paper.

Model target: uptake and distribution of particular technologies within a specific sector; simulation models aim at imitating the behaviour of real-world systems, whereas optimisation models focus on finding the best solutions.

Typical input: depending on the model type (simulation, optimisation), scope and level of detail, different inputs are required, e.g., techno-enviro-economic characterisation of existing and potential buildings and technologies, socio-economic characterisation for actors/investors, market shares, energy service demands (by end-use, energy carrier and/or specific technologies), energy prices, resource potential, availability of energy infrastructure.

Output: demand structures for the consumption and use of energy carriers and technologies, capex, opex, emissions, installed capacities, market shares.

Models: Invert/ee-lab for the buildings sector [37,39,40], TAM (TIMES Actors Model) [41–43], TAM-Households [42], Residential Sector Demand Module National of the Energy Modelling System (NEMS) [44,45], the Canadian Integrated Modelling System (CIMS) [46,47], REF-IF [48], FORECAST model [49], EnergyPLAN [50].

2.3. Literature Overview Considering Social Science Findings and Inclusion in Techno-Economic Models

In the following, literature considering social scientific findings and their inclusion into ESM is shown, following the categorisation of macro-perspective (ESOM and CGE) as well as micro-perspective energy system models.

2.3.1. Macro-Perspective

Energy system optimisation models: Few approaches combine social science approaches with optimising energy system models. One area is the consideration of context scenarios as in [51–53]. The approaches to scenario building differ between story and simulation (SAS) and CIB (cross-impact balance). SAS is a combination of narrative storylines and numerical simulation models. The CIB approach first evaluates the interactions between different scenario descriptors to then ensure a set of consistent parameters. The scenarios are composed partly of qualitative and quantitative descriptors. Some of these quantitative descriptors can be put directly into the model and serve as coupling descriptors [54].

A direct adaptation of an EMS was carried out in [9,55] to combine the aspects of local acceptance for wind turbines and grid expansion with the RenPassGIS! model. A similar approach was used in the 4Nemo project to integrate local acceptance factors in electricity market modelling [56]. In [8], acceptance of renewable energies was indirectly integrated into the ENERTILE model using intangible costs. The inclusion of social science findings into ESMs to include behavioural aspects to account for investment, consumption and preferences are explored, for example in [57].

Previously, the connection between technology genesis, knowledge, technological progress and market diffusion had already formed the basis for the further development of numerous energy system models. One or two-factor learning in different spatial contexts was discussed, e.g., by [58]. The main problem in the application is the requirement of a MILP format (mixed integer linear programming), which leads to increased computational times or drastic reductions in complexity.

Computable equilibrium models: Computable equilibrium models comprise the most commonly used methodology for cost-effectiveness analysis of energy and climate policy instruments. The literature shows approaches for model coupling between a general equilibrium and an energy system model as well as the inclusion of technological details in a CGE model framework. Refs. [16,59] present a hybrid modelling method for including technological details in a CGE model framework and show results for impacts of energy policies in the electricity market. A similar approach with a technologically disaggregated representation of the electricity sector in general equilibrium models is found in [25,60–62].

However, technological disaggregation is not limited to the electricity sector. Various studies focus on the disaggregated representation of the transport sector. These include [63–70]. In the building sector, the inclusion of technological details has not yet progressed as far, with the work of [71] being the most relevant.

Other CGE models also include a more or less detailed disaggregated representation of household energy demand. The SNOW-NO model [35] is a CGE model for Norway, which provides an empirically estimated marginal avoidance cost curve to represent energy efficiency investments in the building sector. It also contains approximate modelling of vehicles and energy sources used by households to produce their mobility services, and a similar approach for buildings and energy sources used to produce space heating services. However, the exact modelling is not further documented. A comparable technology model is contained in the EMEC model, which additionally distinguishes between different groups of households [29,30].

The GEM-E3 model adds durable goods on the consumption side in addition to general productive capital, to adequately take the demand for energy services from households into account by considering vehicle and heating types from a technology perspective. However, the documentation by [31] contains little information on the modelling and calibration process. The IMACLIM-R model for France [32] is one of the few known general equilibrium models that represent vehicles and buildings as durable consumer goods in the provision of the energy services for mobility and space heating by households. This is done in a separate module that transfers the respective initial endowment of production factors (including vehicles and buildings) from one period to the next. Ref. [26] combines most of the

approaches presented and analyses the energy demand of private households in Germany and its significance for climate protection.

Model approaches that focus in particular on CGE modelling of energy efficiency improvements and technical progress can be found in [26,71,72]. Refs. [73–77] examine distributional aspects of climate policy with regard to households. Ref. [78] additionally addresses behavioural aspects. Model approaches that focus in particular on CGE modelling of energy efficiency improvements and technical progress can be found in [25,72,73]. Refs. [74–78] examine the distributional aspects of climate policy concerning households. Ref. [79] additionally addresses behavioural aspects.

2.3.2. Micro-Perspective

Findings from social science are applied in bottom-up energy sector models mainly to explicitly model investment decision behaviour and to identify non-economic barriers and stakeholder specific factors influencing the diffusion of technologies and technology choice. The different approaches in simulation models included (1) the integration of empirical research from discrete choice or conjoint experiments, (2) surveys based on socio-psychological theories and (3) representation of decision-making based on decision heuristics and bounded rationality [37]. Discrete choice analysis (DCA) is a widely used methodology for describing consumer decisions and quantifying decision variables [80]. Since energy sector simulation models often apply the logit-function to model market share distribution, the integration of empirical results from choice experiments are a natural choice. However, only a few studies have shown a direct link between the design and results of a choice experiment and an energy sector model. Within the European project CHEETAH, results from a DCE have been integrated into the Invert/ee-lab model [81].

Some approaches draw on socio-psychological theories to describe consumer behaviour and technology choice as a psychological process based on individual perception, habits and norms [82–84]. A theoretical framework for modelling the investment decision behaviour of residential building owners' technology diffusion of heating systems and efficiency measures, based on the Theory of Planned Behaviour (TPB), has been suggested by [85].

The third category is related to results from social science studies that question the assumption of rationality and describe the decision-making process as a series of different rules or heuristics that are applied depending on the decision situation and degree of information [86–88]. Integration of findings on bounded rationality heuristic decision-making as well as psychological behaviour theories and social interaction in energy sector simulation models can be realised by an agent-based modelling approach. Examples of agent-based modelling approaches explicitly integrating these findings in technology diffusion models are presented in [37,89,90].

Optimisation models aim to identify the least-cost solution to overarching objectives, and while some investment and other behavioural aspects have been included, the aim is not to reflect the behaviour of individuals, as is the case in simulation models. Ref. [56] highlights the most common ways behaviour has been included in micro-ESOMs to date, emphasising that behaviour is often limited to investment and consumption, reflected in models through disaggregation, and varying discount and hurdle rates—applied globally or towards specific sectors or technologies. Optimisation models aim to identify the least-cost solution to overarching objectives, and while some investment decisions and other behavioural aspects have been included, the aim is not to reflect the behaviour of individuals, as is the case in simulation models. Ref. [57] highlights the most common ways behaviour has been included in micro-ESOMs to date, emphasising that behaviour is often limited to investment and consumption, reflected in models through disaggregation, and varying discount and hurdle rates—applied globally or towards specific sectors or technologies.

2.3.3. Summary

In summary, the literature review shows that from the micro-perspective models, different approaches to integrating behaviour are already considered. From the macro-perspective ESOM and

CGE models, the level of technological detail is already being increased in some studies, so that a convergence between market behaviour and technology is taking place. In the areas of ESM from a macro-perspective, it becomes clear that too little attention has been paid to the social sciences, and only individual aspects have been focussed on, such as market distribution, local acceptance or scenarios based on context. This is mainly because the original purpose of the models was to find the cost-optimal solution for the energy system. In the future, however, social boundaries should also be considered in addition to the technical limits of the solution space.

3. Agent-Based Models to Study Technology Genesis and Policy Acceptance

There are social and behavioural factors that are determined by complex and dynamic interrelations between actors. In such cases, it can be beneficial to use dedicated agent-based models to simulate and analyse the underlying processes. In the following, two models will be presented, since these areas have hardly been used in energy system analysis up to now, but play an important role for transformation processes and will be taken up again in the following section.

3.1. Modelling Socio-Political Acceptance

The socio-political acceptance of political interventions (e.g., acceptance of regulations, taxes or subsidies, information campaigns) is one example of a social phenomenon that entails complex and dynamic interrelations between actors. Citizens are those who finally determine whether a policy intervention is accepted or not—however, there is a variety of actors who influence the public perception of policy interventions and interpret and frame the outcomes of public opinion formation (e.g., media, opinion leaders, lobby groups, political parties, etc. [91]).

Model target: in this domain, the goal is to simulate and analyse complex and dynamic relations between individual and collective actors that determine the emergence of socio-political acceptance for different kinds of policy interventions.

Typical input: simulation of social processes within society from different empirical sources, such as input from quantitative surveys (including choice and vignette-experiments as well as ego-centric network analyses), qualitative formats like interviews and focus groups, as well as information from public discourse (analyses of statements in social media, newspaper articles, press releases, etc.).

Output: information about the assertiveness of different policy options—linkable to techno-economic models as well as empirical analyses of issues outside the policy models' scope, identification of policy options that can have a strong impact on the overall CO₂ emissions (output of techno-economic models) and that will likely be well received by citizens (output of policy acceptance models) as well as by investors who actually decide about the uptake of sustainable technologies (output of additional empirical analyses).

Models: One approach to simulate and analyse such processes is currently under development; the PANDORA-model (Policy Acceptance, Diffusion of Opinions and Relations among Actors).

3.2. Technology Genesis Model

Another example of a complex social phenomenon is knowledge generation and exchange, which is the basis for innovation and, thus, technological development and usability in energy systems [92–94]. Cooperation is key between actors like individuals, firms, organisations and networks [95], e.g., in research, education and production. Measures designed to strengthen knowledge-related processes in these areas cannot be captured by current energy systems modelling.

Model target: simulation of knowledge dynamics in innovation networks to assess the effects of financial, procedural and structural measures on innovation activities.

Typical input: data to calibrate the model concerning real actors in the field, including statistical and structural information of innovation networks as well as behaviour in terms of knowledge generation and exchange, as well as production processes on the micro-level. Typically, the input

is gained from a mixed-methods approach including patent analysis, project collaboration analysis, publication analysis, expert workshops, qualitative interviews, and statistical data. Furthermore, revenue potentials or demand of technologies with specific characteristics are required, ideally as model inputs from ESM.

Output: typically represents numerous indicators of the innovation system, simulated based on the assumptions taken. Impacts of politics on innovation activity can be assessed by comparing these indicators with respective assumptions for a predefined focus, like measuring innovation dynamics. Multiple runs considering relevant variations in parameters for each set of assumptions and a specific analysis of the results lead to correlations, which can then be considered in energy system models.

Models: an approach to cover these aspects represents the agent-based Simulating Knowledge Dynamics in Innovation Networks (SKIN) model [96]. It has been adopted for lithium batteries as key energy technologies, resulting in the SKIN-Energy version. A more broadly applicable version is currently under development [97,98].

4. Consideration of Sociological and Behavioural Psychological Aspects in Energy System Models

As a result of an interdisciplinary discourse among energy system modellers, social scientists, psychologists, economists and political scientists, the following social science factors were identified that should be considered in ESM: investment behaviour, user behaviour, local acceptance, technology genesis and political framework conditions. In this section, these aspects are analysed under the criteria: (1) motivation for consideration in ESM, (2) empirical data collection and (3) methods/possibilities for integration in ESM (macro- and micro-perspective). The methods for integration are differentiated into direct model input, monetarisation and soft-linking with other models. Soft-linking means that no direct interface or model iterations are performed, but rather the model output of one model is translated into the model input of the ESM.

4.1. Technology Adoption: Investment Behaviour

Table 1 provides an overview on the market acceptance factors that should be considered in ESM from a macro and micro-perspective (Section 4.1.1), empirical methods for data acquisition (Section 4.1.2), as well as the methods for the integration of investment behaviour into ESM (Section 4.1.3). The table is not to be understood line by line. The connections between the aspects to be considered, data collection and model integration result from the explanations in the text.

Table 1. Overview of objectives, methods of empirical data inquiry and possibilities to integrate aspects of investment behaviour into energy system models (ESMs).

Objective	Measurement/Inquiry for Relevant Data	Integration into Energy System Models	
		Macro-Perspective	Micro-Perspective
Macro-perspective: Aggregated investment behaviour (future realistic market shares)	Quantitative: Surveys, discrete choice experiment (DCE), conjoint experiment latent class analysis (clustering)	<u>Monetarisation:</u> Intangible costs (willingness-to-pay, WTP)	<u>Monetarisation:</u> WTP/ Discount rate for technologies and actors, hurdle rates
Micro-Perspective: Actor type, individual utility, demographics, attitude, decision situation, multi-stakeholders decision etc.	Qualitative: Focus groups, interviews, participatory observation etc.	<u>Direct Input:</u> Upper and lower boundaries for technologies; Technology exclusion	<u>Direct Input</u> Decision criteria, (heuristics) weights, partial-utilities for decision criteria, technologies and actors, actor specific budget/time constraints
		<u>Soft-linking:</u> Technology diffusion model	<u>Soft-linking:</u> Technology diffusion model

4.1.1. Motivation

A key component of the active transformation of the energy system to a climate-neutral system is the actual deployment of novel, more efficient and environmentally-friendly technologies. Based on [99], market acceptance and, thus, the process of market adoption of an innovation is a form of social acceptance. Ref. [100] provides an overview of social science determinants that influence the investment decisions of private and corporate actors. According to economic theory, the investment behaviour of a consumer can be explained by an increased utility compared to the total cost of ownership (TCO) of the consumer product [101]. Besides the primary utility, e.g., the generated heat by heating technologies, the utility created by a product can also be increased or decreased by other influences, e.g., the reduction in CO₂ emissions (e.g., due to environmental consciousness) or the consumer's image. Thus, this additional utility is crucial to understand and to model the adoption of novel technologies, especially for private consumers. However, personal preferences concerning additional utilities can be diverse and are more difficult to establish than preferences relating to monetary attributes of an investment decision. Thus, they are currently more often neglected in techno-economic modelling [102]. Besides, the information sources available to the customer as well as the customer's capacity to gather and process this information (e.g., restricted due to a lack of time or competence) are crucial to understanding the perceived value of different technology options. From a micro-perspective, it is, therefore, useful to consider individual factors that influence the investment decision, such as individual utility, demographics, attitudes, decision situation as well as multi-stakeholder decisions; while, at the macro level, it is important to consider the result of individual decisions in an aggregated form, for example through possible realistic market shares.

4.1.2. Empirical Data

Investment behaviour such as choosing to invest in a renewable heating technology instead of another heating technology is often described by analysing the preference structure of people (e.g., [103]). Before using quantitative multivariate methods to analyse preferences, a crucial question is often what attributes (or characteristics) of a product or choice situation potentially influence these preferences. The selection of attributes for the preference analysis can be chosen from an ad-hoc collection compiled by researchers designing a quantitative analysis of preferences, or by a qualitative analysis based on (expert) interviews or focus groups with the population of interest (e.g., [104]). Employing the latter approach can provide the additional advantage of clarifying theoretical considerations for questionnaire design including the selection of certain attributes for DCEs to reduce the risk of failing to capture relevant aspects of decision-making. Quantitative results regarding preferences can be translated into monetary values by assessing the (marginal) willingness-to-pay (WTP). For established technologies on the markets, those values can be derived from revealed preferences through existing market purchase data (e.g., [105]). To measure the preferences regarding new technologies entering the market, experimental approaches based on stated preferences are often applied. In particular, methods like DCE, where the respondent chooses between different products with different levels of the same attributes, are often used [101]. The results for the preference characteristics can be evaluated individually as, e.g., in [106,107], or used in other models such as diffusion models, e.g., [108,109].

As preferences can be diverse, socio-economic and socio-demographic information as well as, for example, (environmental) attitude are often surveyed in questionnaires to identify clusters (e.g., [103]). To do so, quantitative methods like latent class analysis can be applied. In addition, qualitative methods, such as focus groups, participatory observation or interviews, can be used to get deeper insights into processes that underlie the formation of different preferences.

4.1.3. Model Integration

Macro-Perspective: The results of macro ESM provide an understanding of the technologies that could be used to realise a climate-neutral energy system. In ESM, the costs of the system are optimised

and, at the same time, CO₂ reduction targets are set. This can lead to a result in which, for example, almost all heating systems are replaced with heat pumps and the majority of buildings have been renovated. However, the actual implementation of this is the result of individual heterogeneous investment decisions of private and corporate actors. Individual investment decisions and their influencing factors such as attitude or subjective norm are not represented in macro-perspectives optimising ESM. Great differences in investment behaviour have been shown since there is usually no distinction made between investor groups and their demographics, personal variables such as attitude, norm, conviction and their decision-making behaviour [110]. This leads to a gap between the results from macro-perspective and micro-perspective models due to the differentiation in the definition of the optimum of the system vs. investment behaviour, which ultimately leads to different system designs. One possibility to reduce the gap between investment behaviour and techno-economic overall system optimisation is the use of intangible costs, which can be collected as WTP more in the context of DCE and, thus, allow direct consideration in the ESM. Another possibility to depict investment behaviour in the macro-perspective model is the use of time-resolved upper and lower expansion boundaries and technology exclusion. The basis for this can be the results of other models (such as technology diffusion models using agent-based simulation, discrete choice models, system dynamics or innovation diffusion models [102]) or the application of an S-curve according to the theory of innovation diffusion [111]. The integration of more realistic investment behaviour in ESOM may help to quantify the consequences for other sectors; for example, examining which CO₂ reduction requirements are shifted to the transport sector if insufficient energy renovation rates or reductions are achieved in the building sector. Employing a DCE and the simulation of the diffusion of alternative drive concepts based on a discrete choice model, it was possible to show that if fuel cell electric vehicles (FCEV) are available at the market, they will achieve certain market shares even if direct electric vehicles are the more cost-effective alternative [112]. In [53] it was, therefore, assumed that a certain proportion of FCEVs needs to be met by the ESM REMod to draw a more realistic future scenario. Ref. [113] takes an approach to soft-link a system dynamics diffusion model with TIMES to provide more realistic market shares for FCEV in the vehicle sector. Firstly, it was tested to adjust costs in the ESM, and secondly, to set market shares in the ESM, with the conclusion that the second approach is most useful. Other applications of this modelling approach have been made in modal split adjustments. The basis of the work of [114] is an agent-based model, while [115] builds on a GIS-based analysis. The two studies each link these pre-analyses with a TIMES model for Denmark and the region of Gauteng in South Africa, respectively.

These improvements are also included in CGE models, where the inclusion of technological details is state-of-the-art. As a result, upper and lower expansion boundaries and technology exclusion are possible modelling approaches for CGE models, too. Additionally, the specification of heterogeneous preferences captured in the utility functions enables CGE modellers to depict certain aspects of consumer behaviour and attitude factors. Here, environmental, health or time-use factors represent possible variants as well as higher-level welfare concepts such as happiness, well-being or the economy for the common good. The more empirical knowledge about diffusion and investment processes is available, the more precise the assumptions can be made for ESOM or CGE. This concerns, in particular, investment cycles and technology choices.

Micro-Perspective: Technology adoption from the micro-perspective follows either the simulation or the optimisation methodology and takes into account the adoption pathways for different actors or actor groups. These differences in investment and consumption behaviour by different household categories have been described through the incorporation of behavioural economics [116]. Similarly, different discount rates or intangible costs can also be applied to specific actor groups within a model or sector to express the variation of purchasing and consumption behaviour [57,117]. Results from discrete choice models have also been applied to provide insights about the projections of technology adoption through, for example, discrete choice models [57,118]. The WTP in consumers has been addressed through disaggregation by income group to account for differences in consumption and

affordability [42,117,119,120]. Efforts have been made to include non-technical influences on investment choices; for example, the true costs of modal shifts in the transport sector, which highlights the hidden costs of mode choice [121]. Different investment and consumption behaviour has also been reflected through disaggregation, where different groups or sub-sectors will be modelled with different energy demands, available technologies and discount rates [122–124]. In addition to disaggregation, discount and hurdle rates, the TAM-Households model also makes use of budget constraints to reflect variations in the investment and consumption behaviour of different actors depending on their socio-economic circumstances [42]. Budget and time constraints are factors influencing investment and consumption behaviour of various actors in the model, and have additionally been considered, particularly for households [42,125] and transport [41,126]. This caps the available budget for investment and/or consumption for specific actors and thereby provides the cost-optimal technology choices by a more diverse share of actors. Expressing time constraints reflects the individual’s willingness to compromise on comfort towards more individualised or public solutions, i.e., cars or public transport.

4.2. Local Acceptance for Technologies

Table 2 gives an overview on the aspects that should be considered in techno-economic macro and micro-perspective energy system models concerning local acceptance (Section 4.2.1), how these aspects can be measured (Section 4.2.2) and how they can be integrated into ESM from the macro and micro-perspectives (Section 4.2.3).

Table 2. Overview of objectives, methods of empirical data inquiry and possibilities to integrate aspects of local acceptance into energy system models (ESMs).

Objective	Measurement/Inquiry for Relevant Data	Integration into Energy System Models	
		Macro-Perspective	Micro-Perspective
<u>Macro-level:</u> Local socially-accepted technology potential (saturation-level)	<u>Quantitative:</u> Survey, DCE, experimental and quasi-experimental field studies	<u>Monetarisation:</u> Intangible costs (willingness-to-accept)	<u>Direct Input:</u> User constraints (user-specific discount rates or market shares, hurdle rates, market shares)
<u>Micro-level:</u> Individual factors (not in my back yard, NIMBY), Local social factors, Socio-political factors	<u>Qualitative:</u> Focus groups, interviews, discourse analyses, participatory observation etc.	<u>Direct Input:</u> Regional upper and lower boundaries for technologies; Technology exclusion	<u>Soft-linking:</u> Micro model of local acceptance
		<u>Soft-linking:</u> Micro model of local acceptance	

4.2.1. Motivation

The specific design and speed of transformation of energy systems are strongly influenced by their social evaluation. Social evaluations are complex and, e.g., the authors of [99] propose to differentiate between socio-political acceptance, market acceptance and local acceptance. The focus of many empirical studies on conflicts and questions of acceptance of power system transformation is on local acceptance problems, for example, in grid expansion or the construction of new wind farms [127] or on the acceptance of CO₂ storage sites [128]. The corresponding research has mainly dealt with the NIMBY (not in my backyard) effect (e.g., [129,130]) and was guided by the assumption that the local evaluation and the overall social evaluation of a technology are often contradictory for “selfish” reasons. On an individual micro level, local acceptance is dependent on individual factors like attitudes, landscape aesthetics, additional costs (benefits), knowledge and trust. Yet, conflicting structures and issues of acceptance are anchored at many levels, and as a whole go far beyond local resistance [131]. More recent research points to the connection between political and social acceptance on the one

hand, and local acceptance on the other. For example, local conflicts, which are often (too quickly) categorised as NIMBY, can turn out to be conflicts in which actors reject a transformation pathway that focuses exclusively on the expansion (and, thus, large land consumption) of renewable energies instead of focusing on electricity savings or energy efficiency measures [132]. Other research looks at local conflicts in detail and deals with matters of distributive justice, perceived procedural justice, etc. They address social factors that explain local acceptance. In any case, problems with acceptance can lead to certain technological options being eliminated or becoming significantly more expensive, thus having a major impact on the transformation process as they influence the local socially-accepted technology potential on a macro level.

4.2.2. Empirical Data

For the analysis of local acceptance of energy technologies, social science can draw on quantitative and qualitative methods. Quantitative methods such as surveys, quasi-experimental or experimental field studies and DCEs are suitable for analysing causal or correlational relationships between factors that inhibit or increase the acceptance of technology and the relative importance these factors play in decision-making. Data collected in this way can be integrated via direct interfaces into energy models, for example, when investigating to what extent an increase in distance regulation or the implementation of local citizen participation measures increases the acceptance of wind turbines [8]. At the same time, unravelling the complexities of these issues is not trivial. The use of questionnaires or surveys takes a lot of imagination or experience with a certain technology to be able to visualise what is meant by 100 m, 500 m, etc., and then give reliable information about ones' behaviour when confronted with such a hypothetical scenario. Doing so through means of experimental or quasi-experimental field studies is often more difficult and resource-intensive than applying survey or questionnaire methodologies, but also yields more reliable information about the actual behaviour of participants and the causal—instead of correlational—relationships between factors (e.g., [133]). Qualitative methods (focus groups, interviews, discourse analyses, participatory observation) are used to understand and explore acceptance problems rather than to causally investigate influencing factors. In these methods, text materials (documents, recorded observations, arguments recorded and transcribed during interviews or focus groups) are coded and interpreted by the researcher. Often, a combination of qualitative and quantitative methods is used in which knowledge from qualitative analyses is employed to design and plan quantitative methods. Interviews are often conducted first to gain a better understanding of the object of investigation and then, in a second step, a questionnaire, a DCE or a representative survey is designed.

4.2.3. Model Integration

Macro-Perspective: According to the results of cost-optimising ESOM, wind power plants and transmission grids, which face the majority of local acceptance problems [55], are central technologies in the future energy system [134]. Within the ESOM, the costs as well as the potentials, or so-called cost–potential curves, of the technologies are given as input. The model result is the cost-optimised expansion of the technologies and their regional distribution. This may result in a system where, on the one hand, the expansion burden is higher than socially acceptable and, on the other hand, some regions are more burdened than others because their techno-economic potential is highest. The protests and citizens' movements against wind power or transmission grids show that this assumption of cost-optimal distribution and expansion is biased. One could assume a theoretical saturation limit of technology acceptance. On the one hand, increasing costs or a decline in the annual installed capacity, which may arise if projects are not realised or are delayed due to protests or complaints, need to be taken into account if the expansion is above the saturation limit. On the other hand, the costs or additional technology capacity arising from participation or compensation measures would have to be taken into account to push the saturation point of technology acceptance upwards.

Possibilities to address the issue of local acceptance in energy system models from the macro-perspective are, for example, the consideration of intangible cost, quantified by willingness-to-accept [135]. The potential of technology can be reduced or local upper and lower limits can be set in the ESM to take into account the accepted technology saturation, which can be quantified based on empirical studies. This approach can also be applied for technology-based CGE models (see Section 2.3.2). It should be noted that “saturation” depends on personal factors such as attitudes and norms as well as regional conditions and is very heterogeneous. For technologies with considerable local acceptance problems, technology exclusion can also be implemented in the model. Another possibility is to soft-link with a model addressing local acceptance from a bottom-up perspective.

Examples for the integration of local acceptance in energy system models are shown in [9]. In the context of this work, the wind expansion in the electricity market model renpassG!S was optimised based on an empirically determined local burden level. In [55], the time delay of the transmission network expansion was determined with the same model. In [8], issues of local acceptance of renewable energies were integrated into the ENERTILE electricity market model via intangible costs. Ref. [53] considered aspects of the (un-)acceptance of major infrastructural changes (such as wind onshore expansion, transmission grids and overhead line trucks) in the energy system model REMod by limiting the potential of these technologies or excluding technologies (overhead line trucks).

Micro-Perspective: From the perspective of the investor, as designated in micro-perspective models, acceptance of technologies can be described through exogenously determining discount rates or market shares (i.e., user constraints), which can be applied to different investors or investor groups. Indirect factors that influence the local acceptance of technologies could also include parameters such as recommendations from technicians or relations, or information campaigns. The influence of these factors can be included in optimisation factors through the addition of a lower discount rate to reflect a lower hurdle to investment. Direct factors include defining specific market uptake shares for specific users, e.g., homeowners, through user constraints or profile-specific discount rates. These limits can also be set by soft-linking with a bottom-up model.

4.3. Behavioural Aspects Regarding Technology Use

Table 3 gives an overview on the aspects that should be considered in techno-economic macro and micro-perspective energy system models concerning user behaviour (Section 4.3.1), how these aspects can be measured (Section 4.3.2), and how they can be integrated into ESM from the macro and micro-perspectives (Section 4.3.3).

Table 3. Overview of objectives, methods of empirical data inquiry and possibilities to integrate behavioural aspects into energy system models (ESMs).

Objective	Measurement/Inquiry for Relevant Data	Integration into Energy System Models	
		Macro-Perspective	Micro-Perspective
Macro-perspective Consideration of realistic user patterns (regional differences, simultaneity)	Quantitative: Measurement, generic profiles, Surveys (willingness-to-pay, WTP; willingness-to-accept, WTA)	Soft-linking model coupling: Demand model	Soft model coupling: Demand model
Micro-Perspective Cluster (actor)-specific user behaviour, socio-demographics, attitude, norm, contextual/situational factors of behaviour, lifestyle		Monetarisaton: Intangible costs (WTP, WTParticipate, WTA)	Direct Input Consumer-specific time series, Actor-specific preferences (willingness-to-pay, WTP; willingness-to-participate, WTParticipate; willingness-to-accept, WTA)
Macro and Micro-perspective Convertibility of consumer behavior (grid-friendly behaviour, rebound effect, sufficiency)		Direct Input: Model restrictions, Adaption of end energy demand, price elasticities	

4.3.1. Motivation

User behaviour determines the final energy demand and is, therefore, the starting point for energy system analyses. However, user behaviour is actor-specific and results from individual user behaviour (households/transport), but also industrial production and distribution as well as commercial trade and services. Within the integration of social sciences in ESM, two overarching factors play a special role: first, the inclusion of realistic demand profiles (temporal and regional). On a micro level, these are modelled with individual factors such as socio-demographics, attitudes, norms, lifestyle and also circumstances or context factors [136]. On a macro level, these factors are represented in aggregated form with realistic profiles. Second, the change of *user behaviour*, where aspects such as rebound effects, sufficiency, or grid-friendly behaviour play a role and where it is essential to identify factors and interventions that can effectively and reliably change behaviour (e.g., [137]). Of particular interest are aspects such as which technologies are used by whom and when, as well as the willingness-to-accept (WTA) or to adapt their demand according to, e.g., external controls of operation schedules for home storage systems or electrical vehicles to facilitate grid-friendly demand (e.g., [138]). This aspect becomes more relevant in a future energy system that is characterised by increasing shares of fluctuating renewable energy sources (e.g., [136]).

4.3.2. Empirical Data

User behaviour can be described by constructing individual user profiles. This can be done based on measuring loads resulting from a user interacting with an end-use technology or based on developing synthetic profiles from other sources on user behaviour such as time-use data (e.g., [139]) or more aggregate consumption data. Concerning household technologies, using measurement campaigns of technologies is often a resource-intensive research approach, but it has the advantage of measuring actual demand profiles as they occur in field settings. Depending on the research objective, user profiles can be applied individually or can be aggregated into generic profiles for different user groups. The profiles can have different temporal resolutions and can be measured over different periods. Ref. [105] collected and aggregated 415 individual hourly electricity loads of homeowners' consumption over 12 months. The resulting load profiles were utilised to evaluate the potential for photovoltaic and battery systems under consideration of seasonal effects. Such measured or synthetic profiles can be aggregated to a macro level to account for a region or user group by scaling with appropriate factors (e.g., number of users) and applying stochastic methods. Ref. [140] has modelled the fuel demand profiles for hydrogen vehicles based on the refuelling behaviour of conventional vehicles measured at two filling stations. For a general application of those profiles, a stochastic algorithm has been applied to the time series to receive more realistic profiles without repetitive patterns. Besides, quantitative survey approaches can also be employed to query user behaviour. Especially for novel technologies and the changing energy system, it can be an appropriate approach to describe to what extent users would be willing to adapt their current behaviour, e.g., with a monetarised approach to access the willingness-to-pay and accept (WTP, WTA), e.g., incentives for flexibility provision. For example, Ref. [141] surveyed German households to measure WTP and WTA regarding the security of supply.

4.3.3. Model Integration

Macro-Perspective: The temporal demand for final energy in households, transport, industry and commercial trade and services is the basis of the energy balance in energy system models, whose premise is to meet the demand, to shift it by flexibility options or to reduce it through efficiency measures. However, the availability of demand data is only given for partial areas. Therefore, *model coupling* with bottom-up demand simulation models such as MAED-2 [142], HERMES [143], SynPro [144,145] or Forecast [49] are often used to calculate heating or industrial loads depending on influencing parameters such as weather or GDP and different user behaviour. User behaviour also

depends on other factors such as context, lifestyle, social milieu, attitudes, norms, demography, etc. Correlations between final energy demand over time and personal variables can only be considered in energy system models to a very limited extent and are usually covered through a separate demand simulation. The time horizon of energy system models has a long-term character (mostly 2050), so the change in temporal and absolute demand is an important model input [134].

Concerning flexibility, a key assumption in the ESM is the proportion of the population that accepts external controlling of technologies to ensure network service operation (Willingness-to-participate (WTParticipate), Willingness-to-accept (WTA)). This concerns technologies such as electric vehicles, PV home storage, heat pumps or other household appliances. This can be realised either with model restrictions, where, for example, 30% of the population makes the vehicle available for vehicle-to-grid and grid-to-vehicle applications, [146], or with intangible costs.

Another important aspect regarding energy demand is rebound effects of energy efficiency measures, which has been empirically demonstrated [147]. This effect can be implemented in energy system models through reduced demand (adaption of end energy demand). However, the exact quantification of the effect is subject to uncertainty and also depends on the efficiency measures in question [148]. So far, ESMs have often assumed a constant energy demand, taking into account energy efficiency measures.

The change in demand concerning prices can be quantified using price elasticities. According to [149], long-term elasticities are based on a change in the capital stock, whereas short-term elasticities are based on short-term consumer reactions, which in principle occur without a change in the capital stock. Long-term price elasticities in the energy sector, which are relevant for use in energy system models, are typically related to individual final energy carriers and their respective applications. For broader use of this approach, long-term price elasticities concerning different forms of energy service demands depicted in the models would have to be determined.

However, the importance of sufficiency in modelling is increasing [150]. Sufficient behaviour leads to a reduction in final energy demand. Based on empirical data or assumptions on final energy demand, absolute demand can be adapted, as shown in [53] in the sufficiency scenario.

Micro-Perspective: Variances in consumption behaviour included from the micro-perspective are typically defined through disaggregation of energy demands by the classified consumer groups as a reflection of the drivers of demand for that specific subgroup [116]. These demands can be projected into the future for each defined consumer based on assumptions for either the shift in the number of households in that group or by changing the demand figures based on adjustments in the demand profile (e.g., due to rebound through increased energy efficiency, increased demand from higher appliance use, decrease in demand due to energy efficiency, etc.) [119,123].

4.4. Technology Genesis

Table 4 gives an overview on the aspects that should be considered in techno-economic macro and micro energy system models concerning technology genesis, how these aspects can be measured and how they can be integrated into ESM from the macro and micro-perspectives.

Table 4. Overview of objectives, methods of empirical data inquiry and possibilities to integrate technology genesis into energy system models (ESMs).

Objective	Measurement/Inquiry for Relevant Data	Integration into Energy System Models	
		Macro-Perspective	Micro-Perspective
<u>Macro-level:</u> R&D developments, time of technology genesis	<u>Model</u> Economic micromodel, Technology genesis model	<u>Direct Input</u> Technology parameters, annual upper and lower boundaries for technologies	<u>Direct Input</u> Technology parameters, annual upper and lower boundaries for technologies
<u>Micro-level:</u> Political measures aiming at the (faster) development of new, innovative technologies, Knowledge processes	<u>Quantitative:</u> Statistical data (patent analysis, project collaboration analysis, publication analysis)	<u>Soft-linking:</u> Technology genesis model, economic micromodel (dynamic learning curves)	<u>Soft-linking:</u> Technology genesis model, economic micromodel (dynamic learning curves)
	<u>Qualitative:</u> Expert workshops, interviews etc.		

4.4.1. Motivation

The dynamics in the development of new technologies significantly influence the potential dynamic of meeting targets as well as the necessary composition of technologies in the energy system. This has a strong influence on results from energy systems analyses. The fundamental innovation processes driving technology development (R&D) are highly complex and non-linear [151]. Furthermore, they are characterised by a high number of systems involved, including systems of techniques, economics/markets, production, knowledge and social entities. Furthermore, implementing such technologies requires knowledge and educational management to enable society to deal with new technologies. From a macro-perspective, R&D developments should be considered in terms of techno-economic developments and the duration of the technology genesis. From a micro-perspective, it is important to include both knowledge processes and the impact of *policy measures* towards new innovative technologies.

4.4.2. Empirical Data

One possibility to integrate innovation into ESM is the integration of dynamic learning curves (e.g., [152]). These are outputs of economic micromodels. Another possibility is the (soft) linking with technology genesis agent-based models, as described in Section 3.2. Such genesis models can be calibrated on two levels: on a micro-level of individual behaviour and characteristics of the agents and on a meso level according to the macroscopic empirical occurrence of innovation structures. To get as much information as possible about innovation dynamics in a sector, often mixed-methods approaches are applied. While micro behaviour can be implemented in genesis models via algorithms reflecting findings in the literature about processes of research, development, production, collaboration, and knowledge exchange, statistical data and data of cooperation are needed to characterise agent-types and to try to reproduce observed constellations in innovation networks. Additionally, interviews and expert workshops can be used to focus on questions relevant in practice and to configure the model most realistically. Moreover, the model behaviour and results are compared to real circumstances concerning impacts of measures via what-if experiments and typical innovation dynamics [153,154]. Furthermore, revenue potentials or demand for technologies with specific characteristics is required, ideally as a model input from ESM.

4.4.3. Model Integration

Macro-Perspective: Innovation and innovation processes form the basis of the availability of technology and its techno-economic performance, but also the provision and adequate processing and

transfer of knowledge about this technology and its applicability. This plays a decisive role in energy system models since innovative technologies and further developments of existing technologies are set as model inputs. Knowledge about innovation processes for individual technologies, such as large heat pumps, direct air capture of CO₂ or Carnot batteries, enables this to be taken into account in the energy system model in an appropriate form. The knowledge about innovation and knowledge diffusion can be quantified by empirical work or implemented by direct model integration or model coupling with technology genesis models [155]. Concerning direct model integration, CGE models typically include knowledge as an additional factor in the production factor [25,156].

Agent-based models can be applied to assess the influence of knowledge generation and flows on innovation dynamics [97,98]. A soft-linking of such models with energy system models allows the consideration of measures orientated around knowledge and education aimed at new technologies to foster the energy transition. Output parameters that can be used in ESM for different measures and framework conditions include changes in the time of knowledge diffusion and technology availability, and the associated costs.

Micro-Perspective: From the micro-perspective, innovative technologies are considered in models through their availability to the actor groups at a certain point in time when they come on the market. These technologies will be taken up in optimisation models through their cost-competitiveness.

Empirical studies have shown that the role of intermediaries (such as technicians, handyman) plays a major role in technology adaptation [157,158]. They are often not broadly trained to provide adequate advice to the potential adopters of innovative technologies like heat pumps. There is the possibility of coupling a techno-economic bottom-up model such as Invert/eeLab with a technology genesis model such as SKIN to map the influence of knowledge transfer in the field of intermediaries and thereby do justice to the inclusion of knowledge dissemination.

4.5. Socio-Political Framework Conditions

Table 5 provides an overview on the aspects that should be considered in techno-economic macro and micro energy system models concerning socio-political acceptance (Section 4.5.1), how these aspects can be measured (Section 4.5.2) and how they can be integrated into ESM from the macro and micro-perspectives (Section 4.5.3).

Table 5. Overview of objectives, methods of empirical data inquiry and possibilities to integrate socio-political acceptance into energy system models (ESMs).

Objective	Measurement/Inquiry for Relevant Data	Integration into Energy System Models	
		Macro-Perspective	Micro-Perspective
<u>Micro and Macro level</u> Political strategy (measures) for existing technologies	<u>Quantitative:</u> Laws, Surveys, DCE, Vignette-experiments, ego-centric network analysis, etc.	<u>Direct Input</u> Measures as Hard constraints: bans, standards, new construction, standards, compulsory connection, incentives	<u>Direct Input</u> Measures as Hard constraints: bans, standards, laws, new construction, standards, compulsory connection, incentives
<u>Micro-level</u> Socio-political acceptance	<u>Qualitative:</u> Interviews, focus groups, web-scraping, natural language processing, etc.	<u>Direct Input</u> Context scenarios	<u>Direct Input</u> Context scenarios
	<u>Model:</u> Socio-political acceptance model	<u>Soft-linking</u> Socio-political acceptance model	<u>Soft-linking</u> Socio-political acceptance model

4.5.1. Motivation

Energy system models can account for different socio-political framework scenarios by assuming different learning curves and cost degressions over time (e.g., to account for the dynamics of technology

development) or other technology parameters (e.g., to account for a change in the public perception of technology) as well as by defining model restrictions (e.g., to account for binding regulations like technology bans). With such approaches, it is possible to estimate the range of different dynamics in the transformation of the energy system, depending on different socio-political conditions. Besides, such approaches make it possible to estimate the range of different dynamics in the transformation of the energy system depending on different socio-political conditions. However, it remains undetermined how realistic the occurrence of different socio-political scenarios is or how policy measures should be designed to be effective and efficient. The combination of energy system models with analyses that provide insights into such questions would be of great practical importance.

4.5.2. Empirical Data

There are several approaches for empirical analyses of the socio-political framework conditions. These include different forms of quantitative surveys (e.g., direct measurement by Likert- and rating-scales, discrete-choice- and vignette-experiments or ego-centric network analyses) as well as qualitative approaches (e.g., interviews and focus groups) of the public opinion regarding different political courses of action [91]. In addition, there are also methods to analyse public discourse regarding different political options. These include qualitative or quantitative (e.g., by web-scraping and natural language processing and/or network analyses) content analyses of political documents, news in media portals or comments in social-media (see e.g., [159–163]).

4.5.3. Model Integration

Macro-Perspective: The political framework and its development play a significant role in energy system models. Although ESOMs cannot directly, or can only partially, reflect the effects of single policy measures, they are considered implicitly, as they influence several model parameters. Regulatory measures can be taken into account in ESM by excluding certain technologies, or by making certain assumptions such as “everyone is obliged to provide their electric vehicle for grid stabilisation”. Investment incentives can be implemented by changing cost assumptions. Standards can be adopted through technical parameterisation. The realisability of different framework conditions is related to socio-political acceptance [91]. Socio-political acceptance can be determined by agent-based models based on empirical surveys. As a result, information about the feasibility of different policy measures can help to develop a well-founded scenario framework. The political framework conditions are also often bundled into so-called policy packages. One way of putting together consistent policy packages is the cross-impact balance analysis, which quantifies the mutual interactions of various determinants so that only plausible and consistent combinations of determinants (e.g., political framework conditions) can be chosen.

Micro-Perspective: Policy instruments have also been assessed in micro optimising energy system models to incorporate consideration for targets, requirements for laws, boundaries from regulations as well as incentives [164]. These reflect overarching targets, such as renewable or energy efficiency targets, defined directly through minimum or maximum capacity bounds. Additionally, taxes, such as carbon taxes, can be placed on the consumption of carbon-emitting fuels and the impact on specific actor groups analysed. Policy parameters related to acceptance can be included, as previously stated in Section 4.2.3, through the use of hurdle rates to encourage technology adoption. In micro simulation models, policy measures can be directly integrated, similarly to macro models, concerning standards, bans, incentives, etc. The difference to macro-perspective models is that the effect of the policy measure is endogenously quantified in market shares. This can be utilised by adding a choice attribute into a DCE and gaining utility values for regulatory, financial or nudging measures. Scenario variations can also be applied to evaluate the impacts of certain policies. The feasibility of measures can be implemented as soft-coupling with a socio-political acceptance model to create a valid scenario framework.

5. Concept of Model Coupling

Energy system analyses provide a basis for decision-makers regarding the design of and appropriate policy framework for the energy system. As described in Section 2, there are different approaches and models that assess different questions. The previous section has shown how empirical results and factors from the social sciences can be translated into macro and micro-perspective energy system models. However, it is not—or only barely—possible to develop a single model that takes into account all facets of the energy system, including the social environment. Based on an interdisciplinary discourse, this section suggests how the various models discussed can be coupled with each other to gain a deep understanding of the systemic interrelationships of the energy system and the transformation of the energy system. Figure 2 shows the concept of model coupling. Common to all models is that a context scenario must be defined initially to be able to show which effects arise under certain scenario conditions.

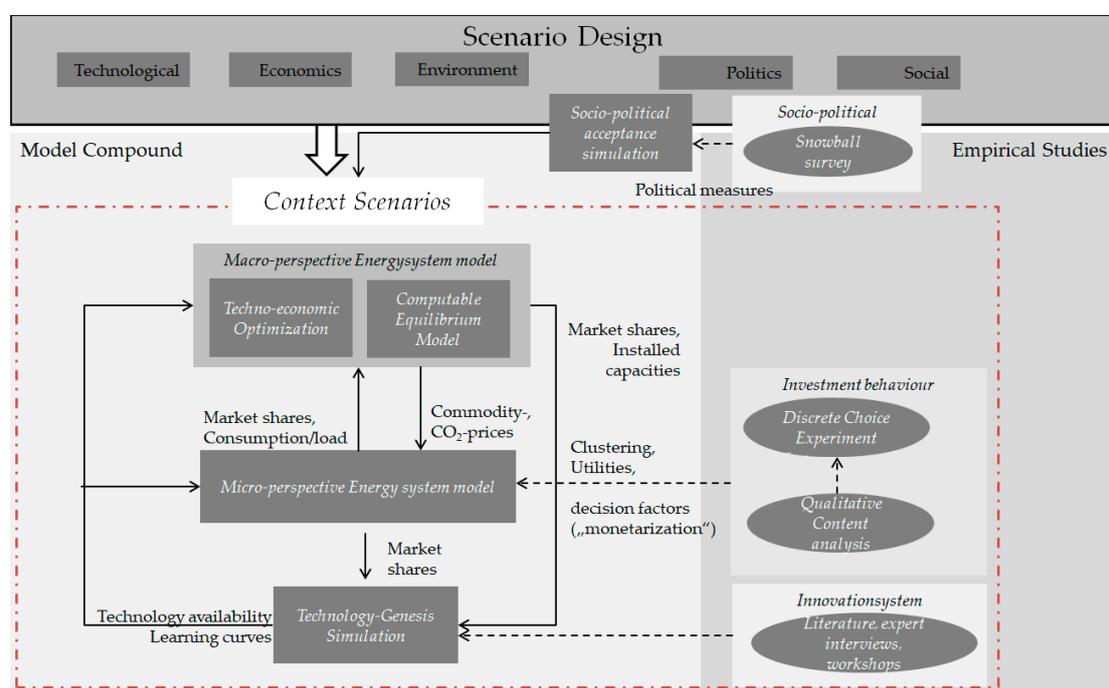


Figure 2. Schematic overview of possible interactions of the energy system model (macro-perspective), transformation path model (micro-perspective), technology genesis model (innovation) and socio-political acceptance model.

The scenarios are composed of various factors from different dimensions, which can be orientated to the social, technical, economic, environmental and political (STEEP) dimensions. When creating scenarios, the mutual influence of the scenario determinants and the resulting potential inconsistency must be taken into account. One approach to address this shortcoming and develop consistent scenarios is the cross-impact balance analysis [54].

If an entire model's compound is considered, as shown in Figure 1, it is helpful to first define a common scenario to provide the framework. It is useful to select determinants that overlap in the different models. Thus, the technological and economic assumptions on price developments, cost developments, lifetimes or efficiencies should be harmonised and possible corridors should be determined. Concerning the policy framework, possible measures should be identified that have to be considered within the models. One aspect is the socio-political acceptance by citizens of these measures influencing the feasibility of the measures and their probability of implementation. Empirical input regarding socio-political acceptance can be gathered through surveys and other quantitative and qualitative methods. By combining these inputs into an agent-based simulation, the feasibility of

different policy frameworks can be analysed and used as input for soft-linking with macro- and micro models (Section 3.1). In addition, common determinants of social dimensions, such as GDP, population development, but also sufficient behaviour or environmental awareness, should be taken into account. About environmental determinants, factors such as air quality or availability of resources can be taken into account. In the context of this article, however, the social factors are the main focus.

The model coupling approach to be applied in this study combines the previously mentioned aspects and the energy transition with regard to heating.

Technological innovation or genesis is the basis for the technological field of transformation processes, such as the energy transition. The political framework sets the conditions, as focused technology research can be carried out, such as the German government's energy research programme or the European Union's Strategic Energy Technology (SET) Plan. Through targeted research and information campaigns, specific technologies are promoted to various actors. In addition to the technology genesis, the diffusion of knowledge is an important driver for the actual establishment of the technology in the market. This includes manufacturers, but also technicians and handymen, who influence the investment decisions of individuals. For the parameterisation of the technology genesis model, empirical studies (interviews, workshops, experts, etc.) are necessary to characterise processes and agents and to calibrate the model to observed innovation network structures, but also possible future market shares of the technology. As a result, an innovation model provides information on the temporal availability and shape of learning curves of technologies, which serve as input in ESM and diffusion models. Furthermore, the assessed amount of knowledge about innovative technologies of installers and craftsmen can be used to improve the modelling of technology diffusion.

Market acceptance or technology diffusion can be simulated or optimised based on micro-perspective energy system models. DCEs are a useful empirical data collection tool, in addition to the literature, as these can map the investment behaviour within an experiment and determine utility values based on which decision model can be built that is also linked to a stock model. The result of the micro-perspective model is the market penetration of technologies like heating systems, shares of heating systems and renovation rates based on investment behaviour under certain conditions.

If the target system is considered without taking investment behaviour into account, most ESM models conclude that heat pumps, as well as grid-bound heat supply with the simultaneous rising of the energy standard, are the solution in the transformation of the heat sector. A look at investment behaviour, however, shows that the majority of investments are made in gas condensing boilers, partly because of decision-making patterns and intermediaries such as technicians and the resulting investment decisions can also be implicitly reflected in the ESM. This makes it possible to quantify the effects of the framework conditions, e.g., in the building sector, on other sectors or imports of electricity or synthetic energy sources. In turn, the coupling is also possible in the other direction: Which basic conditions must be given (evaluation using a micro-perspective model) to reach a future target system.

It should be noted that with this type of model coupling, there is no successive model sequence presented. Instead, knowledge from the different models and their results, as well as the findings of empirical surveys, is made usable by improving the model assumptions of the individual models or the models themselves and by creating interfaces between the models. A common scenario framework is a basis for this. An interdisciplinary discourse clarifies the potentials and possibilities of model coupling. Overall, the analysis on a specific topic, such as the heat transition, can be significantly enriched by using different models and taking into account findings from different areas of transformation.

6. Discussion and Conclusions

Energy system models (ESMs) can serve as decision support tool to inform political decision-makers about the energy transition. Classically, ESMs optimise the system under cost-minimising criteria considering techno-economic parameters, simulate future demand or technology uptake, or use the methodology of equilibrium models. However, the transformation of the energy system to meet climate policy goals and the Paris Accord is a societal process that will not take place as at a cost optimum.

For this reason, an increasing number of studies have been aiming to include social sciences in energy system models. This article reviews these various studies to ascertain which aspects are included in energy system models and how this is accomplished. The review has shown that there is little consensus on which social science factors should be considered and how these can be instrumentalised. Therefore, as a result of an interdisciplinary discourse, this article shows which factors should be considered, how they can be collected and what theoretical possibilities exist to integrate them into ESM. For this purpose, a subdivision of ESM into macro and micro-perspectives was carried out. While the macro-perspective covers the entire energy system, the micro-perspective focuses on techno-economic models that reflect the diffusion of technology. The literature review on the integration of social science factors shows that, up to now, the focus has been on considering only single areas of the social sciences in ESM, such as acceptance or user behaviour.

The following factors were identified: investment behaviour (market acceptance), user behaviour, local acceptance, technology genesis and socio-political acceptance. The empirical methods range from qualitative methods like interviews or focus groups to quantitative ones like discrete choice experiments (DCE) or egocentric network analysis. In the area of integrating social science factors, various options emerge: direct model input via setting upper and lower limits or technology exclusion, and monetisation collected through DCEs, expressed as willingness-to-pay or a soft model coupling. For almost all questions in the context of transformation, findings can be generated through sub-models. Their results can, in turn, be used to feed into ESM. In particular, the areas of technology genesis and socio-political acceptance have so far received little attention in ESM, or their assumptions in ESM are usually not well-founded. Therefore, sub-models are typically employed to analyse these aspects.

For a single model, considering all the aspects discussed, the inherent complexity of such a model would prevent efficient modelling. Therefore, a model compound would be better placed to harmonise the integration of these various areas. A possibility for this was proposed in Section 5, in which coupling between energy system modelling from macro-perspective and microsystem models, in combination with agent-based models with a focus on technology genesis and socio-political acceptance, was presented. To ensure a coherent scenario analysis, the modelling group should define a scenario framework in the form of context scenarios in advance.

In summary, there is a great need to integrate social and individual processes in energy system models to achieve more realistic analyses. However, the social processes are sometimes very complex and only a simplified representation is possible. The article shows how individual points can be addressed, but there is still a great need for interdisciplinary cooperation to make the models and the analysis better and the findings more profound.

Author Contributions: Conceptualization, C.S., A.D., C.K., J.S., U.F., F.W., J.G., S.W., B.D.-F., L.N. and C.B.; methodology, C.S., A.D., C.K., J.S., U.F., F.W., J.G., S.W., B.D.-F., L.N. and C.B.; writing—original draft preparation, C.S., A.D., C.K., J.S., U.F., F.W., J.G., S.W., B.D.-F., W.H. and C.H.; writing—review and editing, C.S., A.D., J.G., S.W., L.N. and C.B.; visualization, C.S.; project administration, J.G. All authors have read and agreed to the published version of the manuscript.

Funding: This paper was developed in the context of the research project “MANIFOLD: Model development and model coupling to actor behaviour in innovation and diffusion networks”, funded by the federal ministry for economic affairs and energy BMWi; Funding code 03EI1006E.

Conflicts of Interest: The authors declare no conflict of interest.

References

1. Pfenninger, S.; Hawkes, A.; Keirstead, J. Energy systems modeling for twenty-first century energy challenges. *Renew. Sustain. Energy Rev.* **2014**, *33*, 74–86. [[CrossRef](#)]
2. Nakata, T. Energy-economic models and the environment. *Prog. Energy Combust. Sci.* **2004**, *30*, 417–475. [[CrossRef](#)]
3. Ringkjøb, H.-K.; Haugan, P.M.; Solbrenke, I.M. A review of modelling tools for energy and electricity systems with large shares of variable renewables. *Renew. Sustain. Energy Rev.* **2018**, *96*, 440–459. [[CrossRef](#)]

4. Cherp, A.; Vinichenko, V.; Jewell, J.; Brutschin, E.; Sovacool, B. Integrating techno-economic, socio-technical and political perspectives on national energy transitions: A meta-theoretical framework. *Energy Res. Soc. Sci.* **2018**, *37*, 175–190. [[CrossRef](#)]
5. Sovacool, B.K. Diversity: Energy studies need social science. *Nature* **2014**, *511*, 529–530. [[CrossRef](#)] [[PubMed](#)]
6. Hodbod, J.; Adger, W.N. Integrating social-ecological dynamics and resilience into energy systems research. *Energy Res. Soc. Sci.* **2014**, *1*, 226–231. [[CrossRef](#)]
7. Webler, T.; Tuler, S.P. Getting the engineering right is not always enough: Researching the human dimensions of the new energy technologies. *Energy Policy* **2010**, *38*, 2690–2691. [[CrossRef](#)]
8. Fuchs, D.; Götz, S.; Graf, A.; Gumbert, T.; Klobasa, M.; Ruddat, M.; Sonnberger, M. Komplementäre Nutzung Verschiedener Energieversorgungskonzepte als Motor Gesellschaftlicher Akzeptanz und Individueller Partizipation zur Transformation Eines Robusten Energiesystems-Entwicklung Eines Integrierten Versorgungsszenarios (Komma-P). Abschlussbericht. 2016. Available online: http://www.energiewende-akzeptanz.de/wp-content/uploads/2017/12/KomMA_P_Abschlussbericht.pdf (accessed on 15 September 2020).
9. Wingenbach, M. *Integration Sozial-Ökologischer Faktoren in die Energiesystemmodellierung. Am. Beispiel von Entwicklungspfaden für den Windnergieausbau in Deutschland, Dissertation*; Zentrale Hochschulbibliothek Flensburg: Flensburg, Germany, 2019.
10. Ridha, E.; Nolting, L.; Praktikno, A. Complexity profiles: A large-scale review of energy system models in terms of complexity. *Energy Strategy Rev.* **2020**, *30*, 100515. [[CrossRef](#)]
11. Lopion, P.; Markewitz, P.; Robinius, M.; Stolten, D. A review of current challenges and trends in energy systems modeling. *Renew. Sustain. Energy Rev.* **2018**, *96*, 156–166. [[CrossRef](#)]
12. Hall, L.M.H.; Buckley, A.R. A review of energy systems models in the UK: Prevalent usage and categorisation. *Appl. Energy* **2016**, *169*, 607–628. [[CrossRef](#)]
13. Foley, A.M.; Ó Gallachóir, B.P.; Hur, J.; Baldick, R.; McKeogh, E.J. A strategic review of electricity systems models. *Energy* **2010**, *35*, 4522–4530. [[CrossRef](#)]
14. Connolly, D.; Lund, H.; Mathiesen, B.V.; Leahy, M. A review of computer tools for analysing the integration of renewable energy into various energy systems. *Appl. Energy* **2010**, *87*, 1059–1082. [[CrossRef](#)]
15. Spittler, N.; Gladkykh, G.; Diemer, A.; Davidsdottir, B. Understanding the Current Energy Paradigm and Energy System Models for More Sustainable Energy System Development. *Energies* **2019**, *12*, 1584. [[CrossRef](#)]
16. Böhringer, C.; Rutherford, T.F. Combining bottom-up and top-down. *Energy Econ.* **2008**, *30*, 574–596. [[CrossRef](#)]
17. Loulou, R.; Goldstein, G.; Kanudia, A.; Lettila, A.; Remme, U. Documentation for the TIMES Model PART I July 2016. Available online: https://iea-etsap.org/docs/Documentation_for_the_TIMES_Model-Part-I_July-2016.pdf (accessed on 15 September 2020).
18. Fraunhofer ISE. National Energy System Model with Focus on Intersectoral System Development-REMod. Available online: <https://www.ise.fraunhofer.de/en/business-areas/power-electronics-grids-and-smart-systems/energy-system-analysis/energy-system-models-at-fraunhofer-ise/remod.html> (accessed on 7 July 2020).
19. Fraunhofer ISI. Welcome to the Enertile @Website. Available online: www.enertile.eu (accessed on 7 July 2020).
20. Howells, M.; Rogner, H.; Strachan, N.; Heaps, C.; Huntington, H.; Kypreos, S.; Hughes, A.; Silveira, S.; DeCarolis, J.; Bazillian, M.; et al. OSeMOSYS: The Open Source Energy Modeling System. *Energy Policy* **2011**, *39*, 5850–5870. [[CrossRef](#)]
21. Pfenninger, S.; Pickering, B. Calliope: A multi-scale energy systems modelling framework. *JOSS* **2018**, *3*, 825. [[CrossRef](#)]
22. Loulou, R.; Goldstein, G.; Noble, K. Documentation for the MARKAL Family of Models October 2004. Available online: https://iea-etsap.org/MrklDoc-I_StdMARKAL.pdf (accessed on 15 September 2020).
23. Böhringer, C. *Allgemeine Gleichgewichtsmodelle als Instrument der Energie-Und Umweltpolitischen Analyse—Theoretische Grundlagen und Empirische Anwendung*; ZEW: Frankfurt am Main, Germany, 1996.
24. Paltsev, S. Moving from Static to Dynamic General Equilibrium Economic Models (Notes for a beginner in MPSGE). Joint Program. In *The Science and Policy of Global Change*; Massachusetts Institute of Technology: Massachusetts, UK, 2004.
25. Zürn, M. *Auswirkungen des Technologischen Fortschritts und des Klimaschutzes auf die Stromerzeugung-Analysen mit Einem Allgemeinem Gleichgewichtsmodell. 1. Aufl*; Reihe: Industrieökonomik 7; Eul Verl: Lohmar, Germany, 2010.

26. Beestermöller, R. Die Energienachfrage Privater Haushalte und Ihre Bedeutung für den Klimaschutz—Volkswirtschaftliche Analysen zur Deutschen und Europäischen Klimapolitik mit Einem Technologiefundierten Allgemeinen Gleichgewichtsmodell: Forschungsbericht Band 128. Ph.D. Thesis, Universität Stuttgart, IER, Stuttgart, Germany, 2017.
27. Weitzel, M.; Ghosh, J.; Peterson, S.; Pradhan, B.K. Effects of international climate policy for India: Evidence from a national and global CGE model. *Environ. Dev. Econ.* **2015**, *20*, 516–538. [[CrossRef](#)]
28. Kiel Institute for the World Economy. Dynamic Applied Regional Trade Model (DART). Available online: <https://www.ifw-kiel.de/institute/research-centers/the-environment-and-natural-resources/articles/dynamic-applied-regional-trade-model-dart/> (accessed on 5 July 2020).
29. Östblom, G.; Berg, C. *The EMEC Model: Version 2.0. Working Paper No. 96*; National Institute of Economic Research: Stockholm, Sweden, 2006.
30. Otto, V. General Equilibrium Modelling-EMEC, National Institute of Economic Research, Stockholm. Available online: <https://www.konj.se/english/about-nier/environmental-economics/general-equilibrium-modelling--emec.html> (accessed on 15 June 2020).
31. Capros, P.; van Regemorter, D.; Paroussos, L.; Karkatsoulis, P. *GEM-E3 Model. Documentation*; Publications Office of the European Union: Copenhagen, Denmark, 2013.
32. Sassi, O.; Crassous, R.; Hourcade, J.C.; Gitz, V.; Waisman, H.; Guivarch, C. IMACLIM-R: A modelling framework to simulate sustainable development pathways. *IJGENVI* **2010**, *10*, 5. [[CrossRef](#)]
33. Montenegro, R.C.; Lekavičius, V.; Brajković, J.; Fahl, U.; Hufendiek, K. Long-term distributional impacts of european cap-and-trade climate policies: A cge multi-regional analysis. *Sustainability* **2019**, *11*, 6868. [[CrossRef](#)]
34. Hermeling, C.; Löschel, A.; Mennel, T. A new robustness analysis for climate policy evaluations: A CGE application for the EU 2020 targets. *Energy Policy* **2013**, *55*, 27–35. [[CrossRef](#)]
35. Bye, B.; Fæhn, T.; Rosnes, O. *Residential Energy Efficiency and European Carbon Policies: A CGE-Analysis with Bottom-Up Information on Energy Efficiency Technologies*; Discussion Papers, No. 817; Statistics Norway, Research Department: Oslo, Norway, 2015.
36. CREE. SNoW-NO Statistics Norway's World Model for Norway. Available online: <https://www.cree.uio.no/models/snow/> (accessed on 13 June 2020).
37. Steinbach, J. *Modellbasierte Untersuchung von Politikinstrumenten zur Förderung Erneuerbarer Energien und Energieeffizienz im Gebäudebereich*; Fraunhofer Verlag: Stuttgart, Germany, 2016; ISBN 3839609879.
38. Mundaca, L.; Neij, L.; Worrell, E.; McNeil, M. Evaluating Energy Efficiency Policies with Energy-Economy Models. *Annu. Rev. Environ. Resour.* **2010**, *35*, 305–344. [[CrossRef](#)]
39. Kranzl, L.; Hummel, M.; Müller, A.; Steinbach, J. Renewable heating: Perspectives and the impact of policy instruments. *Energy Policy* **2013**, *59*, 44–58. [[CrossRef](#)]
40. Müller, A. *Energy Demand Assessment for Space Conditioning and Domestic Hot Water: A Case Study for the Austrian Building Stock. Dissertation*; TU Wien: Vienna, Austria, 2015. [[CrossRef](#)]
41. Ahanchian, M.; Tash, A.; Fahl, U. Methodological improvements to better represent actors' rational mobility and investment behaviour in a TIMES transport energy system model: An optimization approach. In Proceedings of the Social Simulation Conference, Mainz, Germany, 23–27 September 2019.
42. Dobbins, A.H. The Significance of Energy Poverty and Low Income as Key Barriers to the Achievement of Household Energy and Emissions Targets in Germany. Ph.D. Thesis, University of Stuttgart, IER, Stuttgart, Germany, in preparation.
43. Tash, A.; Ahanchian, M.; Fahl, U. Improved representation of investment decisions in the German energy supply sector: An optimization approach using the TIMES model. *Energy Strategy Rev.* **2019**, *26*, 100421. [[CrossRef](#)]
44. DOI/EIA. *Model. Documentation Report: Residential Sector Demand Module of the National Energy Modeling System*; U.S. Energy Information Administration: Washington, DC, USA, 1995.
45. EIA. Residential Demand Module of the National Energy Modeling System: Model. Documentation 2020. 2020. Available online: <https://www.eia.gov/analysis/pdfpages/m067/index.php> (accessed on 1 July 2020).
46. Bataille, C.G.F. *Design and Application of a Energy-Economy Policy Model with Micro and Macro Economic Dynamics*; Simon Fraser University: Burnaby, BC, Canada, 2005.
47. Gamtessa, S. *An. Overview of the Buildings Module of the Canadian Integrated Modelling System (CIMS)*; U.S. Energy Information Administration: Washington, DC, USA, 2006.

48. Giraudet, L.-G.; Guivarch, C.; Quirion, P. Exploring the potential for energy conservation in French households through hybrid modeling. *Energy Econ.* **2012**, *34*, 426–445. [[CrossRef](#)]
49. Fleiter, T.; Rehfeldt, M.; Herbst, A.; Elsland, R.; Klingler, A.-L.; Manz, P.; Eidelloth, S. A methodology for bottom-up modelling of energy transitions in the industry sector: The FORECAST model. *Energy Strategy Rev.* **2018**, *22*, 237–254. [[CrossRef](#)]
50. Lund, H. Energy PLAN Model. Advanced Energy System Analysis Computer Model.-Documentation Version 12. 2015. Available online: www.EnergyPlan.eu (accessed on 20 August 2020).
51. Brown, K.E.; Hottle, T.A.; Bandyopadhyay, R.; Babae, S.; Dodder, R.S.; Kaplan, P.O.; Lenox, C.S.; Loughlin, D.H. Evolution of the United States Energy System and Related Emissions under Varying Social and Technological Development Paradigms: Plausible Scenarios for Use in Robust Decision Making. *Environ. Sci. Technol.* **2018**, *52*, 8027–8038. [[CrossRef](#)]
52. Senkpiel, C.; Hauser, W.; Biener, W.; Längle, S.; Shammugam, S.; Garcia, K.R.; Kost, C. *Modellgestützte Analyse und Bewertung der Auswirkungen Einer Netzautarkie von Regionen im Deutschen Energiesystem. Schlussbericht*; Fraunhofer ISE: Freiburg, Germany, 2019.
53. Sterchele, P.; Brandes, J.; Heilig, J.; Wrede, D.; Kost, C.; Schlegl, T. *Wege Zu Einem Klimaneutralen Energiesystem*; Fraunhofer ISE: Freiburg, Germany, 2020.
54. Weimer-Jehle, W.; Buchgeister, J.; Hauser, W.; Kosow, H.; Naegler, T.; Poganietz, W.-R.; Pregger, T.; Prehofer, S.; von Recklinghausen, A.; Schipll, J.; et al. Context scenarios and their usage for the construction of socio-technical energy scenarios. *Energy* **2016**, *111*, 956–970. [[CrossRef](#)]
55. Degel, M.; Christ, M.; Becker, L.; Grünert, J.; Wingenbach, C. *VerNetzen: Sozial-Ökologische und Technisch-Ökonomische Modellierung von Entwicklungspfaden der Energiewende. Projektabschlussbericht*; Europa-Universität Flensburg Zentrum für nachhaltige Energiesysteme (ZNES): Flensburg, Germany, 2016.
56. Savvidis, G.; Siala, K.; Weissbart, C.; Schmidt, L.; Borggrefe, F.; Kumar, S.; Pittel, K.; Madlener, R.; Hufendiek, K. The gap between energy policy challenges and model capabilities. *Energy Policy* **2019**, *125*, 503–520. [[CrossRef](#)]
57. Daly, H. (Ed.) *How We Treat Behaviour in Energy System Optimisation Models. Proceedings of the International BE4 Workshop on Incorporating Behaviour into Energy Systems Models, London, UK, 20 April 2015*; University College London: London, UK, 2015.
58. Rout, U.K. Modelling of Endogenous Technological Learning of Energy Technologies—An Analysis with a Global Multi-Regional Energy System Model. Ph.D. Thesis, KIIT University, Odisha, India, 2007.
59. Böhringer, C.; Rutherford, T.F. Integrating Bottom-Up into Top.-Down: A Mixed Complementarity Approach. *ZEW-Zent. für Eur. Wirtsch. Cent. Eur. Econ. Res. ZEW Discuss. Pap.* **2005**, 5–28. [[CrossRef](#)]
60. Böhringer, C. The synthesis of bottom-up and top-down in energy policy modeling. *Energy Econ.* **1998**, *20*, 233–248. [[CrossRef](#)]
61. Wing, I.S. The synthesis of bottom-up and top-down approaches to climate policy modeling: Electric power technologies and the cost of limiting US CO₂ emissions. *Energy Policy* **2006**, *34*, 3847–3869. [[CrossRef](#)]
62. Küster, R. *Klimaschutz, Volkswirtschaft und Beschäftigung-Analysen zur Deutschen und Europäischen Klimaschutzpolitik mit Einem Berechenbaren Allgemeinen Gleichgewichtsmodell*; Mensch und Buch Verl.: Berlin, Germany, 2009.
63. Paltsev, S.; Reilly, J.M.; Jacoby, H.D.; Eckaus, R.S.; McFarland, J.R.; Sarofim, M.C.; Asadoorian, M.O.; Babiker, M.H. The MIT Emissions Prediction and Policy Analysis (EPPA) Model.: Version 4. 2005. Available online: <http://globalchange.mit.edu/publication/14576> (accessed on 21 September 2020).
64. Schäfer, A.; Jacoby, H.D. Experiments with a Hybrid CGE-MARKAL Model. *Energy J.* **2006**, *27*, 171–177. [[CrossRef](#)]
65. Berg, C. Household Transport Demand in a CGE-framework. *Environ. Resour. Econ.* **2007**, *37*, 573–597. [[CrossRef](#)]
66. Beestermöller, R.; Abrell, J. (Eds.) *Macroeconomic Assessment of Vehicle Carbon Policies Using a Transport.-CGE-Model. for Germany. In Proceedings of the 12th IAEE European Energy Conference, Venice, Italy, 10–12 September 2012*; Ca' Foscari University: Venice, Italy, 2012.
67. Abrell, J. Transport under Emission Trading-A Computable General Equilibrium Assessment. Ph.D. Thesis, Fakultät Wirtschaftswissenschaften der Technischen Universität Dresden, Dresden, Germany, 2009.
68. Abrell, J. Regulating CO₂ emissions of transportation in Europe: A CGE-analysis using market-based instruments. *Transp. Res. Part D Transp. Environ.* **2010**, *15*, 235–239. [[CrossRef](#)]

69. Karplus, V.; Paltsev, S.; Babiker, M.; Reilly, J. Applying engineering and fleet detail to represent passenger vehicle transport in a computable general equilibrium model. *Econ. Model.* **2013**, *30*, 295–305. [[CrossRef](#)]
70. Karplus, V.J.; Paltsev, S.; Babiker, M.; Reilly, J.M. Should a vehicle fuel economy standard be combined with an economy-wide greenhouse gas emissions constraint? Implications for energy and climate policy in the United States. *Energy Econ.* **2013**, *36*, 322–333. [[CrossRef](#)]
71. Laitner, J.A.; Hanson, D.A. Modeling detailed energy-efficiency technologies and technology policies within a cge framework. *Energy J.* **2006**, *27*, 151–169. [[CrossRef](#)]
72. Hull, D.; Ó Gallachóir, B.P.; Walker, N. Development of a modelling framework in response to new European energy-efficiency regulatory obligations: The Irish experience. *Energy Policy* **2009**, *37*, 5363–5375. [[CrossRef](#)]
73. Bibas, R.; Méjean, A.; Hamdi-Cherif, M. Energy efficiency policies and the timing of action: An assessment of climate mitigation costs. *Technol. Forecast. Soc. Chang.* **2015**, *90*, 137–152. [[CrossRef](#)]
74. Parry, I.W.H.; Sigman, H.; Walls, M.; Williams, R.C., III. *The Incidence of Pollution Control Policies*; Discussion Papers dp-05-24; Resources for the Future: Washington, DC, USA, 2005.
75. Rausch, S.; Metcalf, G.E.; Reilly, J.M. Distributional impacts of carbon pricing: A general equilibrium approach with micro-data for households. *Energy Econ.* **2011**, *33*, 20–33. [[CrossRef](#)]
76. Orlov, A. Distributional effects of higher natural gas prices in Russia. *Energy Policy* **2017**, *109*, 290–600. [[CrossRef](#)]
77. Perera, S.; Siriwardana, M.; Mounter, S. The Impact of Trade Liberalisation on Poverty and Welfare in South Asia: A Special Reference to Sri Lanka. *Poverty Inequal. Policy* **2017**. [[CrossRef](#)]
78. Feng, C.-C.; Chang, K.-F.; Lin, J.-X.; Lin, S.-M. The distributional effect of a carbon tax on income in Taiwan. *Sustainability* **2020**, *12*, 1530. [[CrossRef](#)]
79. Tsvetanov, T.; Segerson, K. Re-evaluating the role of energy efficiency standards: A behavioral economics approach. *J. Environ. Econ. Manag.* **2013**, *66*, 347–363. [[CrossRef](#)]
80. Train, K. *Discrete Choice Methods with Simulation*; University of California: Berkeley, CA, USA; Cambridge University Press: Cambridge, UK, 2002.
81. Braungardt, S.; Durand, A.; Schlomann, B.; Steinbach, J.; Schleich, J.; Whitmarsh, L.; Whittle, C. Changing energy efficiency technology adoption in households. *D 3.3 Work. Pap. Policies*. 2017. Available online: <https://www.briskee-cheetah.eu/> (accessed on 15 September 2020).
82. Ajzen, I. The theory of planned behavior. *Organ. Behav. Hum. Decis. Process.* **1991**, *50*, 179–211. [[CrossRef](#)]
83. Jackson, T. *Motivating Sustainable Consumption—A Review of Evidence on Consumer Behaviour and Behavioural Change*; A Report to the Sustainable Development Research Network; University of Surrey: Guildford, UK, 2004.
84. Rogers, E.M. *Diffusion of Innovations*, 5th ed.; Free Press: Riverside, CA, USA, 2003; ISBN 0743258231.
85. Michelsen, C.C.; Madlener, R. Integrated theoretical framework for a homeowner’s decision in favor of an innovative residential heating system. *SSRN J.* **2010**. [[CrossRef](#)]
86. Gigerenzer, G.; Todd, P.M. (Eds.) *Fast and Frugal Heuristics: The Adaptive Toolbox*; Oxford University Press: Oxford, UK, 1999.
87. Simon, H.A. *Models of Man: Social and Rational; Mathematical Essays on Rational Human Behavior in Society Setting*; Wiley: New York, NY, USA, 1957.
88. Wilson, C.; Dowlatabadi, H. Models of decision making and residential energy use. *Annu. Rev. Environ. Resour.* **2007**, *32*, 169–203. [[CrossRef](#)]
89. Sopha, B.M.; Klöckner, C.A.; Hertwich, E.G. Adoption and diffusion of heating systems in Norway: Coupling agent-based modeling with empirical research. *Environ. Innov. Soc. Transit.* **2013**, *8*, 42–61. [[CrossRef](#)]
90. Wittmann, T. *Agent-Based Models of Energy Investment Decisions*; Physica-Verlag Heidelberg: Heidelberg, Germany, 2008; ISBN 978-3-7908-2003-4.
91. Drews, S.; van den Bergh, J.C.J.M. What explains public support for climate policies? A review of empirical and experimental studies. *Clim. Policy* **2016**, *16*, 855–876. [[CrossRef](#)]
92. Carlsson, B.; Stankiewicz, R. On the nature, function and composition of technological systems. *J. Evol. Econ.* **1991**, *1*, 93–118. [[CrossRef](#)]
93. Wieczorek, A.J.; Negro, S.O.; Harmsen, R.; Heimeriks, G.J.; Luo, L.; Hekkert, M.P. A review of the European offshore wind innovation system. *Renew. Sustain. Energy Rev.* **2013**, *26*, 294–306. [[CrossRef](#)]
94. Hekkert, M.P.; Suurs, R.A.A.; Negro, S.O.; Kuhlmann, S.; Smits, R.E.H.M. Functions of innovation systems: A new approach for analysing technological change. *Technol. Forecast. Soc. Chang.* **2007**, *74*, 413–432. [[CrossRef](#)]

95. Fagerberg, J. *Innovation, A Guide to the Literature*; Oxford University Press: Oxford, UK, 2009.
96. Gilbert, G.N. (Ed.) *Simulating Knowledge Dynamics in Innovation Networks*; Springer: Berlin/Heidelberg, Germany, 2014; ISBN 3662435071.
97. Droste-Franke, B.; Voge, M.; Nietgen, T.; van Doren, D.; O'Sullivan, M.; Deissenroth, M.; Nitsch, F.; Jacqué, K. Simulation von Innovationsdynamiken neuer Schlüsseltechnologien im Energiebereich am Beispiel von Lithium-Batterien. In *Schlussbericht, Projekt InnoSen, BMWi, FKZ 03ET4032*; 2020; in preparation.
98. Droste-Franke, B.; Voge, M.; Fohr, G.; Nietgen, T.; van Doren, D. Simulating Innovation Networks of Lithium Batteries as Key Technologies in German Energy Transition. In *Ahrweiler et al.: Advances in Social Simulation, Springer Proceedings in Complexity*; 2020; in preparation.
99. Wüstenhagen, R.; Wolsink, M.; Bürer, M.J. Social acceptance of renewable energy innovation: An introduction to the concept. *Energy Policy* **2007**, *35*, 2683–2691. [[CrossRef](#)]
100. Schrage, A.; Wassermann, S.; Berneiser, J.; Gözl, S. Sozialwissenschaftliche Determinanten von Investitionsentscheidungen in erneuerbare Energietechnologien; Stuttgarter Beiträge zur Risiko-Und Nachhaltigkeitsforschung. 2018. Available online: https://elib.uni-stuttgart.de/bitstream/11682/9607/1/%c3%9cberblickstudie_Schrage%20et%20al%202018.pdf (accessed on 8 February 2018).
101. Zweifel, P.; Praktiknjo, A.; Erdmann, G. *Energy Economics—Theory and Applications. Theory and Applications*; Springer: Berlin/Heidelberg, Germany, 2017; ISBN 3662530201.
102. Senkpiel, C.; Berneiser, J.; Steingrube, A.; Biener, W.; Gözl, S. Modeling investment decisions in renewable energy technologies: An introduction to simulating technology diffusion: Schwerpunktthema: Investitionsentscheidungen im Umweltkontext. *Umweltpsychologie* **2019**, *23*, 38–57.
103. Alriksson, S.; Oberg, T. Conjoint analysis for environmental evaluation—a review of methods and applications. *Environ. Sci. Pollut. Res. Int.* **2008**, *15*, 244–257. [[CrossRef](#)]
104. Louviere, J.J.; Flynn, T.N.; Carson, R.T. Discrete Choice Experiments Are Not Conjoint Analysis. *J. Choice Model.* **2010**, *3*, 57–72. [[CrossRef](#)]
105. Klingler, A.-L. Self-consumption with PV + Battery systems: A market diffusion model considering individual consumer behaviour and preferences. *Appl. Energy* **2017**, *205*, 1560–1570. [[CrossRef](#)]
106. Michelsen, C.C.; Madlener, R. Homeowners' preferences for adopting innovative residential heating systems: A discrete choice analysis for Germany. *Energy Econ.* **2012**, *34*, 1271–1283. [[CrossRef](#)]
107. Troiano, S.; Vecchiato, D.; Marangon, F.; Tempesta, T.; Nassivera, F. Households' Preferences for a New 'Climate-Friendly' Heating System: Does Contribution to Reducing Greenhouse Gases Matter? *Energies* **2019**, *12*, 2632. [[CrossRef](#)]
108. Ernst, A.; Briegel, R. A dynamic and spatially explicit psychological model of the diffusion of green electricity across Germany. *J. Environ. Psychol.* **2017**, *52*, 183–193. [[CrossRef](#)]
109. Byrka, K.; Jędrzejewski, A.; Sznajd-Weron, K.; Weron, R. Difficulty is critical: The importance of social factors in modeling diffusion of green products and practices. *Renew. Sustain. Energy Rev.* **2016**, *62*, 723–735. [[CrossRef](#)]
110. Salm, S. The investor-specific price of renewable energy project risk—A choice experiment with incumbent utilities and institutional investors. *Renew. Sustain. Energy Rev.* **2018**, *82*, 1364–1375. [[CrossRef](#)]
111. Rogers, E.M. *Diffusion of Innovations*, 3rd ed.; Free Press: New York, NY, USA; Collier Macmillan: London, UK, 1983; ISBN 0-02-926650-5.
112. Senkpiel, C.; Berneiser, J.; Baumann, D. Long-term diffusion of alternative private passenger cars in Germany. *Transp. Part D* **2020**, submitted.
113. Blanco, H.; Gómez Vilchez, J.J.; Nijs, W.; Thiel, C.; Faaij, A. Soft-linking of a behavioral model for transport with energy system cost optimization applied to hydrogen in EU. *Renew. Sustain. Energy Rev.* **2019**, *115*, 109349. [[CrossRef](#)]
114. Ahanchian, M.; Gregg, J.S.; Tattini, J.; Karlsson, K.B. Analyzing effects of transport policies on travelers' rational behaviour for modal shift in Denmark. *Case Stud. Transp. Policy* **2019**, *7*, 849–861. [[CrossRef](#)]
115. Tomaschek, J. *Long-Term Optimization of the Transport Sector to Address Greenhouse Gas Reduction Targets under Rapid Growth: Application of an Energy System Model for Gauteng Province, South Africa*; University of Stuttgart: Stuttgart, Germany, 2013. [[CrossRef](#)]
116. Cayla, J.-M.; Maïzi, N. Integrating household behavior and heterogeneity into the TIMES-Households model. *Appl. Energy* **2015**, *139*, 56–67. [[CrossRef](#)]

117. Jaccard, M. Energy-Economy Modeling and Behavioral Realism: How Much is Useful? In *Be4 Conference on Incorporating Behaviour into Energy Systems Models*; University College London: London, UK, 2015.
118. Horne, M.; Jaccard, M.; Tiedemann, K. Improving behavioral realism in hybrid energy-economy models using discrete choice studies of personal transportation decisions. *Energy Econ.* **2005**, *27*, 59–77. [[CrossRef](#)]
119. Tomaschek, J.; Dobbins, A.; Fahl, U. A Regional TIMES Model for Application in Gauteng, South Africa. 2012. Available online: <https://administration.ier.uni-stuttgart.de/publications/display/1069/de> (accessed on 15 September 2020).
120. Reveiu, A.; Smeureanu, I.; Dardala, M.; Kanala, R. Modelling Domestic Lighting Energy Consumption in Romania by Integrating Consumers Behavior. *Proced. Comput. Sci.* **2015**, *52*, 812–818. [[CrossRef](#)]
121. Sikharulidze, A.; Goldstein, G.; Delaquil, P. Incorporating behavior change through modal-shifts in the MARKAL-Georgia transport sector. In Proceedings of the International BE4Workshop, London, UK, 20 April 2015. Available online: https://iea-etsap.org/workshop/be4_workshop/be4-sikharulidze-presentation.pdf (accessed on 15 September 2020).
122. Ramea, K.; Bunch, D.; Yeh, S.; Ogden, J. Cochin times: Integration of Vehicle Consumer Choice in TIMES Model and its Implications for Climate Policy Analysis. In Proceedings of the International BE4Workshop, London, UK, 20 April 2015. Available online: https://iea-etsap.org/workshop/be4_workshop/be4-ramea-presentation.pdf (accessed on 15 September 2020).
123. Dobbins, A.; Fahl, U.; Hufendiek, K. Assessing the impact of energy poverty in the energy system through the application of a regional times model: Lessons from a case study in Gauteng, South Africa. In Proceedings of the International BE4Workshop, London, UK, 20 April 2015. Available online: https://iea-etsap.org/workshop/be4_workshop/be4-dobbins-presentation.pdf (accessed on 15 September 2020).
124. Kanala, R.; Caliskan, M.; Dardala, A.; Dardala, M.; Fragnière, E.; Furtuna, T.F.; Moresino, F.; Smeureanu, I.; Titan, E. Assessing demand side behaviour in long term energy modelling: The case of Romanian Social MARKAL. In Proceedings of the International BE4Workshop, London, UK, 20 April 2015. Available online: https://iea-etsap.org/workshop/be4_workshop/be4-kanala-presentation.pdf (accessed on 15 September 2020).
125. Dias, L.P.; Simões, S.; Gouveia, J.P.; Seixas, J. City energy modelling—Optimising local low carbon transitions with household budget constraints. *Energy Strategy Rev.* **2019**, *26*, 100387. [[CrossRef](#)]
126. Tattini, J.; Ramea, K.; Gargiulo, M.; Yang, C.; Mulholland, E.; Yeh, S.; Karlsson, K. Improving the representation of modal choice into bottom-up optimization energy system models—The MoCho-TIMES model. *Appl. Energy* **2018**, *212*, 265–282. [[CrossRef](#)]
127. Sonnberger, M.; Ruddat, M. Disclosing citizens’ perceptual patterns of the transition to renewable energy in Germany. *Nat. Cult.* **2018**, *13*, 253–280. [[CrossRef](#)]
128. Scheer, D.; Konrad, W.; Wassermann, S. The good, the bad, and the ambivalent: A qualitative study of public perceptions towards energy technologies and portfolios in Germany. *Energy Policy* **2017**, *100*, 89–100. [[CrossRef](#)]
129. Dear, M. Understanding and Overcoming the NIMBY Syndrome. *J. Am. Plan. Assoc.* **1992**, *58*, 288–300. [[CrossRef](#)]
130. Devine-Wright, P. Rethinking NIMBYism: The role of place attachment and place identity in explaining place-protective action. *J. Community Appl. Soc. Psychol.* **2009**, *19*, 426–441. [[CrossRef](#)]
131. Batel, S. Research on the social acceptance of renewable energy technologies: Past, present and future. *Energy Res. Soc. Sci.* **2020**, *68*, 101544. [[CrossRef](#)]
132. Reusswig, F.; Braun, F.; Heger, I.; Ludewig, T.; Eichenauer, E.; Lass, W. Against the wind: Local opposition to the German Energiewende. *Util. Policy* **2016**, *41*, 214–227. [[CrossRef](#)]
133. Walter, G. Determining the local acceptance of wind energy projects in Switzerland: The importance of general attitudes and project characteristics. *Energy Res. Soc. Sci.* **2014**, *4*, 78–88. [[CrossRef](#)]
134. Pfluger, B.; Tersteegen, B.; Franke, B.; Bernath, C.; Bossmann, T.; Deac, G.; Elsland, R.; Fleiter, T.; Kühn, A.; Ragwitz, M.; et al. Modul 10.a: Reduktion der Treibhausgasemissionen Deutschlands um 95% bis 2050 Grundsätzliche Überlegungen zu Optionen und Hemmnissen. Langfristszenarien für die Transformation des Energiesystems in Deutschland-Studie im Auftrag des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie. 2017. Available online: https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Downloads/B/berichtsmodul-10-a-bericht-reduktion-der-treibhausgasemissionen-deutschlands-langfassung.pdf?__blob=publicationFile&v=4 (accessed on 25 March 2019).

135. García, J.H.; Cherry, T.L.; Kallbekken, S.; Torvanger, A. Willingness to accept local wind energy development: Does the compensation mechanism matter? *Energy Policy* **2016**, *99*, 165–173. [CrossRef]
136. Wille, F. Theoretical and empirical analysis of user-behavior. Development of a Process for Integrated Development and Evaluation of Energy Scenarios for Lower Saxony—Final Report of the Research Project Neds–Nachhaltige Energieversorgung Niedersachsen. 2019. Available online: <https://cuvillier.de/de/shop/publications/8139-development-of-a-process-for-integrated-development-and-evaluation-of-energy-scenarios-for-lower-saxony> (accessed on 15 September 2020).
137. Moore, H.E.; Boldero, J. Designing Interventions that Last: A Classification of Environmental Behaviors in Relation to the Activities, Costs, and Effort Involved for Adoption and Maintenance. *Front. Psychol.* **2017**, *8*, 1874. [CrossRef] [PubMed]
138. Fell, M.J.; Shipworth, D.; Huebner, G.M.; Elwell, C.A. Public acceptability of domestic demand-side response in Great Britain: The role of automation and direct load control. *Energy Res. Soc. Sci.* **2015**, *9*, 72–84. [CrossRef]
139. Torriti, J. A review of time use models of residential electricity demand. *Renew. Sustain. Energy Rev.* **2014**, *37*, 265–272. [CrossRef]
140. Grüger, F.; Dylewski, L.; Robinius, M.; Stolten, D. Carsharing with fuel cell vehicles: Sizing hydrogen refueling stations based on refueling behavior. *Appl. Energy* **2018**, *228*, 1540–1549. [CrossRef]
141. Praktijnjo, A.J. Stated preferences based estimation of power interruption costs in private households: An example from Germany. *Energy* **2014**, *76*, 82–90. [CrossRef]
142. IAEA. Model for Analysis of Energy Demand (MAED-2). Available online: <https://www.iaea.org/publications/7430/model-for-analysis-of-energy-demand-maed-2> (accessed on 7 March 2020).
143. Hennessy, H.; Fitzgerald, J. *The HERMES Model of the Irish Energy Sector*; ESRI: Redlands, CA, USA, 2011.
144. Fischer, D.; Surmann, A.; Biener, W.; Selinger-Lutz, O. From residential electric load profiles to flexibility profiles—A stochastic bottom-up approach. *Energy Build.* **2020**, 110133. [CrossRef]
145. Fischer, D.; Härtl, A.; Wille-Haussmann, B. Model for electric load profiles with high time resolution for German households. *Energy Build.* **2015**, *92*, 170–179. [CrossRef]
146. Pregger, T.; Luca de Tena, D.; O’Sullivan, M.; Roloff, N.; Schmid, S.; Propfe, B.; Hülsebusch, D.; Wille-Haussmann, B.; Schwunck, S. *Perspektiven von Elektro-/Hybridfahrzeugen in Einem Versorgungssystem mit Hohem Anteil Dezentraler und Erneuerbarer Energiequellen*; DLR: Stuttgart, Germany; FhG-ISE: Freiburg, Germany; RWTH: Aachen, Germany, 2012. Available online: https://www.dlr.de/tt/desktopdefault.aspx/tabid-2885/4422_read-15380/ (accessed on 15 September 2020).
147. Seebauer, S. The psychology of rebound effects: Explaining energy efficiency rebound behaviours with electric vehicles and building insulation in Austria. *Energy Res. Soc. Sci.* **2018**, *46*, 311–320. [CrossRef]
148. Azevedo, I.M.L. Consumer End-Use Energy Efficiency and Rebound Effects. *Annu. Rev. Environ. Resour.* **2014**, *39*, 393–418. [CrossRef]
149. Laege, E. Entwicklung des Energiesektors im Spannungsfeld von Klimaschutz und Ökonomie: Eine Modellgestützte Systemanalyse. Ph.D. Thesis, Universität Stuttgart—Institut für Energiewirtschaft-Und Rationelle Energieanwendung, Stuttgart, Germany, 2001.
150. Zell-Ziegler, C.; Förster, H. Mit Suffizienz Mehr Klimaschutz Modellieren. Zwischenbericht. 2018. Available online: <https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/suffizienz-mehr-klimaschutz-modellieren> (accessed on 24 January 2020).
151. Landau, R.; Rosenberg, N. (Eds.) *The Positive Sum Strategy. Harnessing Technology for Economic Growth*; National Academy Press: Washington, DC, USA, 1986; ISBN 6610222061.
152. Görig, M.; Breyer, C. Energy learning curves of PV systems. *Environ. Prog. Sustain. Energy* **2016**, *35*, 914–923. [CrossRef]
153. Droste-Franke, B.; Fohr, G. Simulating innovation of key technologies in German energy transition. In Proceedings of the Social Simulations Conference, ESSA, Dublin, Ireland, 25–29 September 2017; pp. 25–29.
154. Globisch, J.; Droste-Franke, B.; Fohr, G.; Wassermann, S. Simulation von Innovationsdynamiken im Kontext der Energiewende. *TATuP* **2019**, *28*, 34–40. [CrossRef]
155. Forum für Energiemodelle. *Forum für Energiemodelle und Energiewirtschaftliche Systemanalysen in Deutschland: Energiemodelle zu Innovation und Moderner Energietechnik—Analyse Exogenen und Endogenen Technischen Fortschritts in der Energiewirtschaft*; LIT Verlag Münster: Münster, Germany, 2007.

156. Wang, K.; Wang, C.; Chen, J. Analysis of the economic impact of different Chinese climate policy options based on a CGE model incorporating endogenous technological change. *Energy Policy* **2009**, *37*, 2930–2940. [[CrossRef](#)]
157. Arning, K.; Dütschke, E.; Globisch, J.; Zaunbrecher, B. The challenge of improving energy efficiency in the building sector: Taking an in-depth look at decision-making on investments in energy-efficient refurbishments. In *Energy and Behaviour: Towards a Low Carbon Future*; Lopes, M., Antunes, C.H., Janda, K.B., Eds.; Academic Press, an Imprint of Elsevier: Amsterdam, The Netherlands, 2020; pp. 129–151, ISBN 9780128185674.
158. Arning, K.; Zaunbrecher, B.S.; Ziefle, M. The Influence of Intermediaries' Advice on Energy-Efficient Retrofit Decisions in Private Households. In Proceedings of the eceee 2019 Summer Study, Belambra Presqu'île de Giens, France, 3–8 June 2019.
159. Liu, B. Sentiment Analysis and Opinion Mining. *Synth. Lect. Hum. Lang. Technol.* **2012**, *5*, 1–167. [[CrossRef](#)]
160. Semetko, H.A.; Valkenburg, P.M.V. Framing European politics: A Content Analysis of Press and Television News. *J. Commun.* **2000**, *50*, 93–109. [[CrossRef](#)]
161. Bowen, G.A. Document Analysis as a Qualitative Research Method. *Qual. Res. J.* **2009**, *9*, 27–40. [[CrossRef](#)]
162. Palau, R.M.; Moens, M.-F. Argumentation mining. In Proceedings of the 12th International Conference, Barcelona, Spain, 8–12 June 2009; ACM: New York, NY, USA, 2009; p. 98, ISBN 9781605585970.
163. Blei, D.M.; Ng, A.J.; Jordan, M.I. Latent Dirichlet allocation. *J. Mach. Learn. Res.* **2003**, 993–1022.
164. Fais, B. Modelling Policy Instruments in Energy System Models-The Example of Renewable Electricity Generation in Germany: Band 121. Ph.D. Thesis, University of Stuttgart, Stuttgart, Germany, 2015.



© 2020 by the authors. Licensee MDPI, Basel, Switzerland. This article is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

A.1.3 Meilenstein-Dokument 4: „Definition von Anforderungen an empirischen Input für die Akteursmodelle (Empirie → Akteursmodelle) und Konkretisierung der Schnittstellen zwischen Akteursmodellen und Remod, TIMES, Enertile und Invert/EE-Lab“

Manifold

Empirie und Modellschnittstellen

Anforderungen an Empirie als Input für Modelle sowie Schnittstellen zwischen Akteurs-, Diffusions-, Energiesystem- und Strommarktmodellen.

Anhang A.1.3: Bericht zum Meilenstein 4

Ort: Karlsruhe

Datum: Dezember 2023

Diese Arbeit wurde durch das BMWi gefördert.

© Fraunhofer ISI, IQIB GmbH, IER Universität Stuttgart, ZIRIUS Universität Stuttgart, IREES GmbH, Fraunhofer ISE, FCN RWTH Aachen University, IPMB TU Braunschweig (2021) Manifold. Empirie und Modellschnittstellen. Anforderungen an Empirie als Input für Modelle sowie Schnittstellen zwischen Akteurs-, Diffusions-, Energiesystem- und Strommarktmodellen. Bericht zum Meilenstein 4. Karlsruhe

Impressum

Empirie und Modellschnittstellen

Autorinnen und Autoren:

Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung ISI, Karlsruhe

Heike Brugger, heike.brugger@isi.fraunhofer.de; Alexandra Pröpfer, alexandra.pröpfer@isi.fraunhofer.de;
Joachim Globisch, joachim.globisch@isi.fraunhofer.de; Christoph Kleinschmitt,
christoph.kleinschmitt@isi.fraunhofer.de

Institut für qualifizierende Innovationsforschung und -beratung (IQIB), Bad Neuenahr-Ahrweiler

Bert Droste-Franke, bert.droste-franke@iqib.de; Markus Voge, markus.voge@iqib.de

Institut für Energiewirtschaft und Rationelle Energieanwendung (IER), Universität Stuttgart

Audrey Dobbins, audrey.dobbins@ier.uni-stuttgart.de; Ulrich Fahl, ulrich.fahl@ier.uni-stuttgart.de

Zentrum für interdisziplinäre Risiko- und Innovationsforschung (ZIRIUS), Universität Stuttgart

Sandra Wassermann, sandra.wassermann@zirius.uni-stuttgart.de; Wolfgang Hauser,
wolfgang.hauser@zirius.uni-stuttgart.de

Institut für Ressourceneffizienz und Energiestrategien (IREES), Karlsruhe

Jan Steinbach, j.steinbach@irees.de

Fraunhofer Institut für Solare Energiesysteme (ISE), Freiburg

Charlotte Senkpiel, charlotte.senkpiel@ise.fraunhofer.de

Lehrstuhl für Energiesystemökonomik, InsInstitute for Future Energy Consumer Needs and Behavior (FCN-ESE), RWTH Aachen University

Christina Kockel, christina.kockel@eonec.rwth-aachen.de; Lars Nolting, lars.nolting@eonec.rwth-aachen.de

Technische Universität Braunschweig, Institut für Psychologie, Abteilung für Psychologische Methodenlehre und Biopsychologie (IPMB)

Farina Wille, farina.wille@tu-braunschweig.de

Fördermittelgeber

Projekträger Jülich für das Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK)

Veröffentlicht

Dezember 2023

Hinweise

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 Auftraggebers wider.

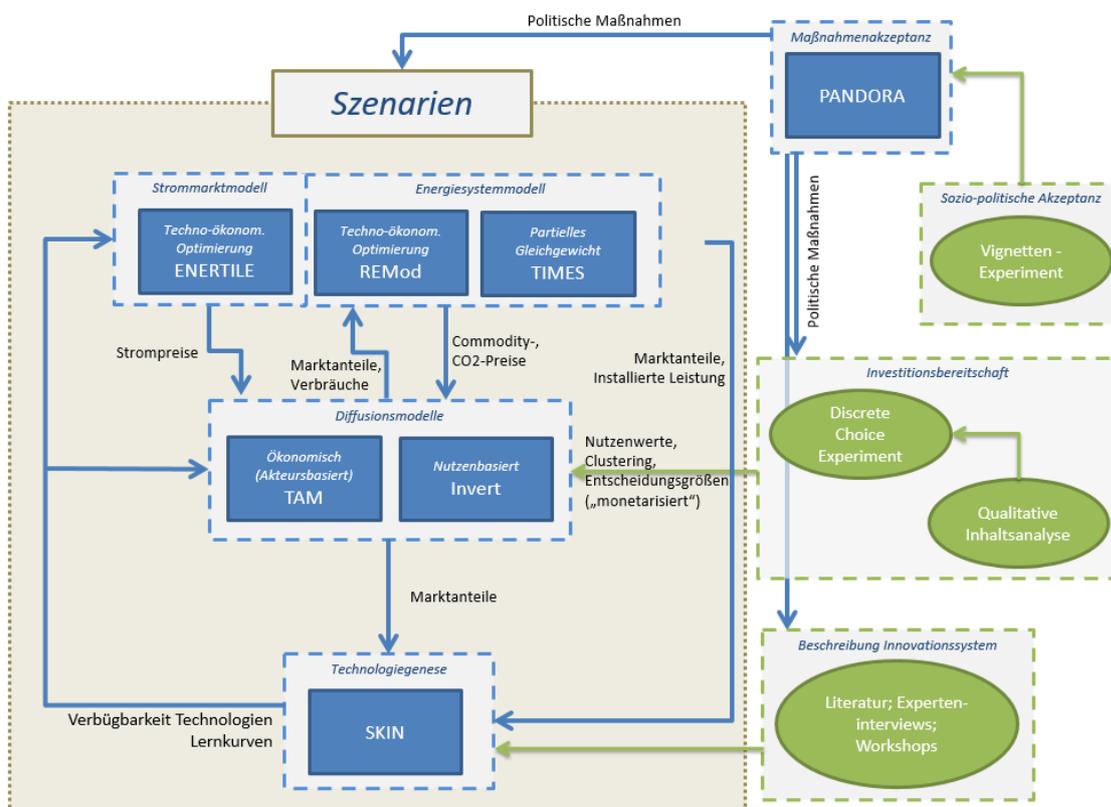
Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	4
2	Empirie und Modellschnittstellen	6
2.1	Empirische Arbeiten zur Verbesserung der Technologiegenese-Modellierung	6
2.1.1	Experteninterviews, Workshops	6
2.1.2	Empirie als Input für das SKIN-Modell	7
2.2	Ermittlung der Investitionsbereitschaft	7
2.2.1	Discrete Choice Experiment (DCE)	7
2.2.2	Qualitative Interviews	8
2.2.3	Integration der Qualitativen Interviews und des DCE	9
2.2.4	DCE-Ergebnisse als Input für TAM/INVERT	9
2.3	Empirie als Input für das Akteursmodell PANDORA	10
2.3.1	Vignetten-Experiment	10
2.3.2	Einbindung der Ergebnisse in PANDORA	12
3	Modellintegration	14
3.1	Schnittstellen zwischen PANDORA, den Modellen SKIN, Invert/TAM und den Energiesystemmodellen: Definition politischer Szenarien mit den Ergebnissen aus PANDORA	14
3.2	Schnittstelle zwischen dem SKIN Modell, den Energiesystemmodellen REMod und TIMES und dem Strommarktmodell ENERTILE	14
3.2.1	Marktanteile, installierte Leistungen	14
3.2.2	Verfügbarkeit, Technologien, Lernkurven, "Wissen"	15
3.3	Schnittstelle zwischen dem SKIN-Modell und dem Diffusionsmodell INVERT	15
3.3.1	Marktanteile	15
3.3.2	Verfügbarkeit, Technologien, Lernkurven	16
3.4	Schnittstelle zwischen den Diffusionsmodellen INVERT/TAM, den Energiesystemmodellen REMod und TIMES und dem Strommarktmodell ENERTILE ..	16
3.4.1	Commodity- (auch Strom-), CO ₂ -Preise, Emissionsfaktoren	16
3.4.2	Marktanteile, Verbräuche	16
4	Referenzen	17
A.1	Annex - Modellbeschreibungen	18
A.1.1	Modellbeschreibung PANDORA	18
A.1.2	Modellbeschreibung SKIN	18
A.1.3	Modellbeschreibung INVERT	19
A.1.4	Modellbeschreibung TAM	24
A.1.5	Modellbeschreibung ENERTILE	25
A.1.6	Modellbeschreibung REMOD	27
A.1.7	Modellbeschreibung TIMES	31

1 Einleitung

Der Manifold-Bericht zum Meilenstein 4 definiert die Anforderungen an empirischen Input für die (Akteurs-)Modelle und konkretisiert die Schnittstellen zwischen den Akteurs- und Diffusionsmodellen PANDORA, SKIN, TAM und Invert/EE-Lab, den Energiesystemmodellen REMod und TIMES und dem Strommarktmodell ENERTILE. Die jeweiligen Schnittstellen und vorgesehenen Modellkopplungen, welche ein tieferes Verständnis für die systemischen Zusammenhänge des Energiesystems und einer Transformation desselben ermöglichen sollen, sind in Abbildung 1 dargestellt.

Abbildung 1: Modellschnittstellen und Modellintegration in Manifold



Gemeinsam entwickelte Szenarien bilden den Rahmen für die Modellkopplung. Die Determinanten dafür werden so ausgewählt, dass sie den verschiedenen Modellen gemein sind. So werden die technologischen und wirtschaftlichen Annahmen zu Preisentwicklungen, Kostenentwicklungen, Lebensdauern oder Wirkungsgraden harmonisiert und mögliche Korridore bestimmt. Auch politische Rahmenbedingungen werden in den Szenarien definiert. Ein Aspekt ist die gesellschaftspolitische Akzeptanz der Bürger für diese Maßnahmen, die die Machbarkeit der Maßnahmen und deren Umsetzungswahrscheinlichkeit beeinflusst. Empirische Erkenntnisse über die gesellschaftspolitische Akzeptanz können durch Umfragen und andere quantitative und qualitative Methoden gewonnen werden. Durch die Kombination dieser Eingaben in einer agentenbasierten Simulation kann die Durchführbarkeit von unterschiedlichen politischen Rahmenbedingungen analysiert und als Input für die Verknüpfung mit Makro- und Mikromodellen genutzt werden (siehe Überlegungen zum PANDORA-Modell). Politische Rahmenbedingungen können gezielte Technologieforschung fördern, wie zum Beispiel das Energieforschungsprogramm der Bundesregierung oder der Strategieplan für Energietechnologie (SET) der Europäischen Union. Durch gezielte Forschung und Informationskampagnen werden bestimmte Technologien bei

verschiedenen Akteuren beworben. Neben der Technologiegenese ist die Wissensdiffusion ein wichtiger Treiber für die tatsächliche Etablierung der Technologie auf dem Markt. Dazu gehören Hersteller, aber auch Techniker und Handwerker, die Investitionsentscheidungen des Einzelnen beeinflussen. Für die Parametrisierung des Technologiegenesemodells SKIN sind empirische Untersuchungen (Interviews, Workshops, Experten, etc.) notwendig, um Prozesse und Akteure zu charakterisieren und das Modell an beobachteten Innovationsnetzwerkstrukturen, aber auch an möglichen zukünftigen Marktanteilen der Technologie zu kalibrieren. Im Ergebnis liefert ein Innovationsmodell Informationen über Auswirkungen implementierter Maßnahmen auf die zeitliche Verfügbarkeit und auf Lernkurven von Technologien, die als Input in Energiesystemmodelle und Diffusionsmodelle dienen. Darüber hinaus kann der abgeschätzte Wissensstand über innovative Technologien von Installateuren und Handwerkern genutzt werden, um die Modellierung der Technologiediffusion zu verbessern.

Die Marktakzeptanz bzw. Technologiediffusion kann auf Basis von mikroperspektivischen Energiesystemmodellen simuliert oder optimiert werden. Discrete Choice-Experimente (DCE) sind ein nützliches Instrument zur empirischen Datenerhebung, da diese das Investitionsverhalten innerhalb eines Experiments abbilden und Nutzwerte ermitteln können. Das Ergebnis des Mikroperspektivenmodells ist die Marktdurchdringung von Technologien wie Heizungsanlagen, Anteile von Heizungsanlagen und Sanierungsraten auf Basis des Investitionsverhaltens unter bestimmten Bedingungen. Wenn das Zielsystem ohne Berücksichtigung des Investitionsverhaltens betrachtet wird, kommen die meisten Energiesystemmodelle zu dem Ergebnis, dass Wärmepumpen sowie eine netzgebundene Wärmeversorgung bei gleichzeitiger Anhebung des Energiestandards von Gebäuden die Lösung bei der Transformation des Wärmesektors sind.

Umgekehrt ist die Kopplung auch in die andere Richtung möglich: Welche Rahmenbedingungen müssen gegeben sein, um ein zukünftiges Zielsystem zu erreichen. Es ist zu beachten, dass bei dieser Art der Modellkopplung keine sukzessive Modellfolge präsentiert wird. Vielmehr wird das Wissen aus den verschiedenen Modellen und deren Ergebnissen sowie die Erkenntnisse aus empirischen Erhebungen durch die Schaffung von Schnittstellen zwischen den Modellen nutzbar gemacht. Ein interdisziplinärer Diskurs verdeutlicht die Potenziale und Möglichkeiten der Modellkopplung. Insgesamt kann die Analyse zu einem bestimmten Thema, wie zum Beispiel der Wärmeversorgung, durch die Verwendung verschiedener Modelle und die Berücksichtigung von Erkenntnissen aus verschiedenen Bereichen der Transformation deutlich bereichert werden.

Im Folgenden werden die abgebildeten Schnittstellen und Modellkopplungen entlang der Abbildung 1 genauer diskutiert.

2 Empirie und Modellschnittstellen

2.1 Empirische Arbeiten zur Verbesserung der Technologiegenese-Modellierung

Die Prozesse zur Entstehung von Innovationen sind komplex und bestehen aus vielen Einzelschritten, die miteinander verwoben sind. Das zu betrachtende System besteht aus den Technologien (Hardware), aber auch aus Marktaspekten, Produktionsmitteln und -wissen sowie dem sozialen Kontext der Akteure. Um zum einen die relevanten Aspekte abdecken zu können und zum anderen die Innovationslandschaft möglichst gut abzubilden, stellen vor diesem Hintergrund Informationen von Akteuren im Feld zu den wichtigen Themen sowie zur Charakterisierung von Akteuren und ihrer Umwelt einen wesentlichen Input zur Modellierung von Innovationsnetzwerken im Technologiegenesemodell SKIN dar. Die hierzu verwendeten Ansätze werden im Folgenden beschrieben.

2.1.1 Experteninterviews, Workshops

Die empirischen Analysen als Grundlage des SKIN-Modells dienen im Sinne eines Co-Designs der Gestaltung des Modells und folgen einem Mixed-Methods-Ansatz. Dabei werden quantitative und qualitative Methoden gemischt, um eine realitätsnahe Abbildung von Prozessen der Innovationsgenese zu ermöglichen. Wertvolle Informationen dazu werden aus qualitativen Erhebungen in Form von Experteninterviews und Workshops gewonnen. Mit ihnen werden die wesentlichen Akteure und Funktionsmuster analysiert und die aktuelle Funktionserfüllung bzw. entsprechende Innovationshemmnisse identifiziert. Aus den Analysen können dann wichtige Fragen an das Modell abgeleitet werden. Zusätzlich werden Modellergebnisse im Hinblick auf ihre Realitätsnähe und daraus ableitbare Handlungsempfehlungen diskutiert. Die Grundlagen für die qualitativen Analysen bildet die Theorie Technologischer Innovationssysteme. Um das gesamte Innovationssystem zu charakterisieren, werden die Analysen entlang der sieben typischen Funktionen Technologischer Innovationssysteme durchgeführt:

1. Unternehmerisches Experimentieren
2. Entstehung von Wissen
3. Diffusion von Wissen
4. Suchrichtung
5. Ressourcenmobilisierung
6. Marktformierung
7. Legitimität

Die Interviews und Workshops werden in mehreren aufeinander aufbauenden Schritten durchgeführt. Experteninterviews werden zunächst dazu genutzt, einen ersten Überblick über das Innovationssystem und einen Einblick in die wichtigsten Akteure und Strukturen zu gewinnen und diesen zu vertiefen. Im ersten Workshop werden bereits identifizierte Hemmnisse entlang der sieben Funktionen Technologischer Innovationssysteme diskutiert, kommentiert, korrigiert und ergänzt. Das Ergebnis ist ein fundierter Überblick über das Innovationssystem und aktuelle Hemmnisse sowie erste mögliche Politikmaßnahmen, durch die sie beseitigt oder abgeschwächt werden können. Die Ergebnisse des Workshops stellen eine wesentliche Grundlage für die Gestaltung des SKIN-Modells dar. Vorhandene Prozesse werden überprüft und wo notwendig ergänzt, um die wesentlichen Fragen bezüglich der Wirkung verschiedener Politikmaßnahmen beantworten

zu können. Der Schwerpunkt der Modellierung liegt dabei auf Wissensgenerierung und -austausch. Nach Umsetzung des Modells und der Durchführung von Experimenten zur Beantwortung der Fragen werden die Modellergebnisse in einem weiteren Workshop im Hinblick auf ihre Aussagekraft und Realitätsnähe diskutiert. Gegebenenfalls werden noch weitere Änderungen im Modell vorgesehen bzw. weitere Experimente durchgeführt, um die Analysen zu verbessern.

2.1.2 Empirie als Input für das SKIN-Modell

Die in den Interviews und den Workshops erhaltenen Erkenntnisse gehen im Rahmen des oben beschriebenen iterativen Prozesses in die Modellentwicklung ein. Auf Basis ihrer Grundlagen werden modellierte Prozesse gestaltet, die Modellauflösung gewählt und die Parametrisierung des Modells erarbeitet. Die qualitativen Ergebnisse werden dabei unterstützt durch quantitative Daten aus Statistiken zu Unternehmen und Branchen, Patenten, Forschungs- und Entwicklungsprogrammen. Aus ihnen werden Zahlen erarbeitet, die im Modell direkt verwendet werden können. Im Projekt stehen vor allem die Schnittstellen zu anderen Energiemodellen im Fokus. Deswegen wird das Modell auch ganz wesentlich durch bereits in anderen Modellen als zentral erkannte Parameter geleitet. Beispielsweise soll die sukzessive Wissens- und Produktentwicklung aus bereits vorhandenem Wissen besser als bisher abgedeckt werden, um die technologische Entwicklung fundierter darstellen zu können. Zudem ergibt sich im betrachteten Bereich der Wärmetechnologien eine spezielle Rolle von Installateuren und damit ein großer Einfluss ihres Wissens auf die Vermarktung der Technologien. Der Wissensfokus des Modells soll hier dazu genutzt werden, die Modellierung entsprechender Investitionsentscheidungen in anderen Modellen zu ergänzen.

2.2 Ermittlung der Investitionsbereitschaft

Im folgenden Kapitel wird auf die empirische Erhebung von Zahlungsbereitschaften und deren Integration in die Energiesysteme eingegangen. Dafür werden zunächst die quantitative Erhebung mittels eines Discrete Choice Experiments (DCE) in Abschnitt 2.2.1 und die qualitative Inhaltsanalyse in Abschnitt 2.2.2 dargestellt. Darauf aufbauend wird in Abschnitt 2.2.3 erörtert, wie die Ergebnisse der Inhaltsanalyse in das Umfragedesign des DCEs aufgenommen werden. Wie die finalen Ergebnisse der empirischen Erhebung in die Diffusionsmodelle Invert/ee-Lab und TAM integriert werden, legt Abschnitt 2.2.4 dar.

2.2.1 Discrete Choice Experiment (DCE)

Die Zahlungsbereitschaften von Haushalten für neuartige Heizungstechnologien sollen über ein Discrete Choice Experiment (DCE) ermittelt werden, dabei liegt ein besonderer Analysefokus auf den Hauseigentümern als Entscheidungsträger. Bei dem Experiment werden die Befragten zunächst mit einem Szenario vertraut gemacht, in diesem Fall eine anstehende Investitionsentscheidung für ein neues Heizungssystem. Die Probanden werden dann in eine Entscheidungssituation versetzt und erhalten als Wahlmöglichkeit – auch Choice Set genannt – eine Reihe von verschiedenen Alternativen, aus denen sie eine auswählen müssen. Dabei wird jede Alternative durch vordefinierte Attribute beschrieben. Als Attribute werden zum einen die Investitionskosten und die jährlichen Betriebskosten gesetzt. Für die spätere Kopplung zu den verschiedenen Akteuren in den Diffusionsmodellen werden zusätzlich weitere Attribute aufgenommen, wie beispielsweise der Zeitaufwand für die Informationssuche und die Hauptinformationsquelle bei der Entscheidung. Bei der Erstellung des DCEs wird ein effizientes Design der Choice Sets sowie deren Aneinanderreihung berücksichtigt, um Verzerrungen in den Antworten der Befragten zu verhindern. Unter Zuhilfenahme von beispielsweise multinominalen logistischen Regressionen können darüber Zahlungsbereitschaften berechnet werden. Diese kann als Grundlage für den Input in Diffusionsmodelle dienen, wie von den Projektpartnern in Senkpiel et al. (2020) beschrieben.

Zusätzlich werden die Teilnehmenden zum einen nach ihren sozio-demographischen Angaben gefragt und zum anderen gebeten, ihre persönlichen Präferenzen bezüglich lokaler, sozio-politischer und Marktakzeptanz auf einer Likert-Skala einzuschätzen. Durch diese Angaben können die Zahlungsbereitschaften geclustert werden. Analog zu den empirischen Arbeiten für das Vignetten-Experiment (siehe Abschnitt 2.3.1) werden abschließend hypothetische Politikszenerarien gezeigt und Präferenzen für diese abgefragt. Die Zahlungsbereitschaften lassen sich durch diese Präferenzangaben weiter analysieren und clustern.

Ein erstes, darauf basierendes Umfragekonzept wurde bereits konzeptioniert und ist als Pilotstudie an eine repräsentative Menge verteilt. Für das technologie-generische DCE wurden dabei die Attribute „Investitionskosten“, „Jährliche Betriebskosten“, „CO₂-Emissionsreduzierung“, „Zeitaufwand für die Informationssuche“ und „Hauptinformationsquelle“ gewählt. Die Ergebnisse dieses Testlaufes bieten bereits relevante Zusammenhänge für die Zahlungsbereitschaften von Haushalten hinsichtlich neuartiger Heizungstechnologien. Die Schnittstellen zu den Modellen können damit genauer definiert und praktisch getestet werden. Für die Wahl der Ausprägungen, insbesondere der Attribute bezüglich der Informationsbeschaffung, hat sich gezeigt, dass noch Konkretisierungsbedarf besteht. Diese können durch qualitative Interviews spezifiziert werden, worauf der nächste Abschnitt 2.2.2 eingeht. Zudem können Erkenntnisse der Pilotstudie dabei in die geplante qualitative Analyse einfließen.

2.2.2 Qualitative Interviews

Schnittstellenaufgabe der qualitativen Interviews ist es, empirische Daten zu erfassen, die die Auswahl der Attributdimensionen des DCE inhaltlich begründen und einen Bezug zum tatsächlichen Wahlverhalten herstellen. Wie in der gemeinsamen Veröffentlichung des Projektkonsortiums herausgearbeitet, stellt die qualitative Analyse von Interviewmaterial eine Möglichkeit dar, auf Ebene der Mikro-Perspektive verhaltens- und einstellungsbezogene empirische Informationen in Energiesystemmodelle zu integrieren (Senkpiel et al. 2020). Die in den Interviews zu erhebenden Daten sowie die im DCE abgebildete Auswahlentscheidung sollen Wahlentscheidungen zur Adoption bzw. Kaufverhalten bei innovativen Wärmetechnologien von Mieter*innen und Eigentümer*innen von Wohnungen und Häusern, bzw. Teilgruppen dieser, abbilden.

Ein Teil der übergeordneten Projektfragestellung bezieht sich auf die Interaktion zwischen Akteur*innen. Im Rahmen der qualitativen Analyse soll ein Fokus darauf gelegt werden, welche Konsequenzen in der Interaktion mit Installateur*innen relevant sein können für das Auswahlverhalten. Auf Grundlage von theoretischen Vorüberlegungen wurden in einer Pilotstudie zum DCE bereits die Attribute „Zeitaufwand der Informationssuche“ und „Hauptinformationsquelle“ exploriert. Die Gestaltung der Attributabstufungen „Zeitaufwand der Informationssuche“ und die Interaktionsbeziehung zum Installateur bedürfen nach jetzigem Stand der Ergebnisse weiterer Analyse, so dass diese in den qualitativen Interviews weiterhin fokussiert werden sollen.

Aufgrund der begrenzten Ressourcen für 10 Interviews soll im Rahmen der qualitativen Analyse ein Fokus erstens darauf gelegt werden, welche Konsequenzen für die Wahlentscheidungen der Gruppe der potentiellen Adopter*innen relevant sind, und zweitens, welche gemeinsamen Kontingenzen in der Interaktion mit Installateur*innen eine Rolle spielen.

Anders als ursprünglich geplant, müssen die Interviews aufgrund der anhaltenden Covid-19-Pandemie online durchgeführt werden.

2.2.3 Integration der Qualitativen Interviews und des DCE

Verhaltenstheoretisch selektieren Konsequenzen das Verhalten. Für Anwendungsfragestellungen, wie sie versucht werden, in DCEs bezüglich der Gewichtung unterschiedlicher Merkmale für Auswahlverhalten zu beantworten, ist es deshalb essenziell, bei der Gestaltung der Merkmale bzw. Attribute die zentralen Konsequenzen für das Wahlverhalten zu bestimmen.

Die Anzahl der Attribute, die in einem DCE integriert werden können, ist begrenzt. Eine vorab begründete Auswahl kann dabei helfen, die Auswahl-situation angemessener abzubilden. Das gilt insbesondere, da es sich bei DCE um fiktive und nicht tatsächliche Auswahl-situationen handelt. Der Bezug zu konkreten Auswahlentscheidungen, wenn auch vermittelt berichtet über Verbalverhalten in qualitativen Interviews und nicht direkt über Verhaltensbeobachtung, stellt dafür eine wichtige Brückenfunktion dar. Denn ein DCE liefert zwar Gewichtungen für die Wichtigkeit verschiedener Attribute, kann aber keine Argumentation dafür liefern, weshalb ein Attribut relevant für eine Auswahl-situation sein sollte oder nicht.

Aufgrund von theoretischen Überlegungen zu relevanten Konsequenzen, können Annahmen über potenziell interessante Merkmale abgeleitet werden. So ist beispielsweise bei Wahlverhalten eine zeitliche Dimension von Bedeutung und könnte in Form eines Attributs wie "Zeitaufwand für die Informationssuche" im Rahmen des DCE integriert werden.

Für die Integration der qualitativen Analyse in das DCE wird ein Experiment gebaut, das als Attributdimensionen Konsequenzen abbildet, die sich in der qualitativen Analyse für die Auswahl von innovativen Wärmetechnologien als relevant herausstellen. Es ist zu erwarten, dass nicht alle als relevant betrachteten Konsequenzen im DCE abgebildet werden können. Nach Möglichkeit werden die verbleibenden Konsequenzen in den Präferenzabfragen verortet.

2.2.4 DCE-Ergebnisse als Input für TAM/INVERT

Durch die Integration der empirischen DCE-Ergebnisse in die Diffusionsmodelle Invert/ee-lab und TAM entsteht ein methodischer Mehrwert, da so individuelle Entscheidungskalküle der Gebäudeeigentümer berücksichtigt werden können. Darüber kann die Entwicklung der Marktanteile von Wärmeversorgungs-technologien verbessert abgeschätzt und damit die Entwicklung des Wärmebedarfs und der Treibhausgasemissionen unter verschiedenen Rahmenbedingungen über Szenarien bewertet werden.

Aus den Ergebnissen des DCEs werden Präferenzen für einzelne Attribute der Wärmeversorgungs-technologien ermittelt sowie eine Clusterung der Entscheider vorgenommen, die sich hinsichtlich dieser unterscheiden. Konkret werden dabei die Gebäudeeigentümer geclustert, die sich mit Bezug auf die Relevanz einzelner Entscheidungskalküle (Gewichtung der Attribute) unterscheiden, und die Anteile dieser Cluster mit Bezug auf die Grundgesamtheit aller selbstnutzenden Gebäudeeigentümer bestimmt.

Im Invert /ee-lab und TAM werden die Ausprägungen der einzelnen Technologien ermittelt und die Clusterung der Investoren (Gebäudeeigentümer) aus dem DCE hinterlegt. Die Präferenzen für die Attribute je Cluster ergeben sich aus dem DCE als Gewichte, mit der ein Gesamtnutzwert für die zur Auswahl stehenden Technologien ermittelt werden kann. Im Modell werden die verschiedenen Entscheidercluster und deren Präferenzen hinterlegt. Sofern es die Ergebnisse aus der DCE erlauben, werden die Anteile der einzelnen Entscheidercluster am Gebäudebestand im Weiteren genutzt. Falls keine Hochrechnung der Clusteranteile aus der DCE auf die Grundgesamtheit der selbstnutzenden Eigentümer möglich ist, werden in den Diffusionsmodellen verschiedene Anteile als Sensitivitäten gerechnet. In Invert/ee-Lab werden die Ausprägungen der realen Technologien in den einzelnen Referenzgebäuden ermittelt (entsprechend der definierten Attribute aus den DCE). Im zweiten Schritt werden die Gesamtnutzenwerte anhand der Präferenzen für die einzelnen

Wärmeversorgungstechnologien für jede Kombination aus Entscheidertyp (Cluster aus dem DCE) und Referenzgebäudetyp (aus der Invert/ee-Lab Gebäudedatenbank) ermittelt. Im dritten Schritt werden die Marktanteile auf Basis der Gesamtnutzenwerte mit einem Nested-Logit-Modell simuliert. Vereinfacht gesprochen erhält die Technologie mit dem höchsten Gesamtnutzen für den jeweiligen Versorgungsfall (Referenzgebäude) den höchsten Marktanteil. Liegen die Technologien hinsichtlich ihres Gesamtnutzenwertes aus Sicht des Entscheiders nahe beieinander, resultieren auch Marktanteile in ähnlicher Größenordnung. In TAM werden diese als Marktanteile mit Unter- und Obergrenzen angegeben und dabei wird das Modell innerhalb dieses Korridors die optimale Diffusion der Investitionen vornehmen.

2.3 Empirie als Input für das Akteursmodell PANDORA

Die empirische Analyse im Rahmen des Projektes soll unter anderem zu einem besseren Verständnis der Mechanismen führen, welche im Hinblick auf die sozio-politische Akzeptanz von Politikmaßnahmen eine Rolle spielen und zudem der Parametrisierung des PANDORA-Modells dienen. Konkret verfolgt die im Folgenden beschriebene empirische Analyse dabei die folgenden beiden Zielsetzungen:

- Die Identifikation von Faktoren, die die Akzeptanz von politischen Maßnahmen beeinflussen.
- Die Identifikation von Subgruppen, die sich bezüglich der Bedeutung und Wahrnehmung dieser Einflussfaktoren unterscheiden.

2.3.1 Vignetten-Experiment

Die empirische Erhebung wird in Form eines Vignetten-Experiments umgesetzt. Bei einer Vignette handelt es sich um eine Situationsbeschreibung, die von den Befragten hinsichtlich der interessierenden Aspekte bewertet wird. Im Rahmen eines Vignetten-Experiments bewerten die Befragten mehrere Vignetten – der Inhalt der Vignetten wird dabei jeweils variiert, um feststellen zu können, welchen Einfluss die Änderungen auf die Bewertungen des Befragten haben. Im konkreten Fall wurden die Vignetten den Befragten in Form eines Zeitungsartikels präsentiert, in dem über eine geplante politische Maßnahme zur Reduzierung des CO₂-Ausstoßes von Wohngebäuden berichtet wurde. Der Text der Vignetten variierte dabei hinsichtlich folgender Aspekte:

- Inwieweit die Politikmaßnahme Ge- und Verbote enthält.
- In welchem Umfang die Politikmaßnahme mit (steuerbedingten) Preiserhöhungen für konventionelle Energieträger verbunden ist.
- Inwieweit Hersteller und Installateure, die viele konventionelle Heizsysteme verkaufen, über Strafzahlungen sanktioniert werden.
- Für welche Zwecke die Einnahmen verwendet werden, die durch (steuerbedingte) Preiserhöhungen und evtl. Strafzahlungen von Herstellern oder Installateuren anfallen.
- Welche zivilgesellschaftlichen Akteure die geplante Politikmaßnahme kritisieren.

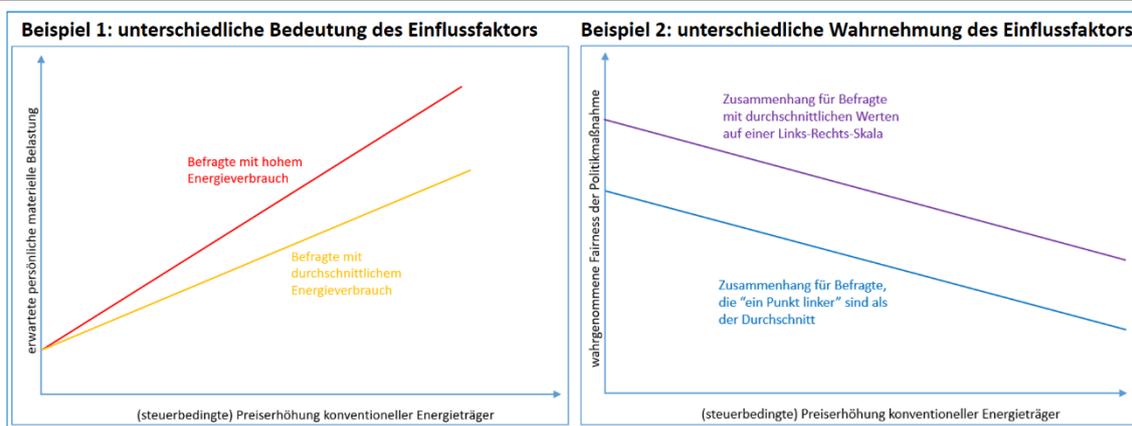
Zur Erfassung der sozio-politischen Akzeptanz wurden die Befragten gebeten, bei jeder Vignette anzugeben, inwieweit sie die Politikmaßnahme befürworten oder ablehnen. Um den Einfluss sozialer Normen auf die sozio-politische Akzeptanz untersuchen zu können, wurde zudem gefragt, welche Reaktionen auf die Politikmaßnahme die Befragten aus ihrem sozialen Umfeld erwarten. Weiterhin wurde jeweils die Einschätzung der Befragten dazu erhoben, für wie fair und wie wirksam sie die Politikmaßnahme halten und inwieweit sie glauben, dadurch persönlich materiell belastet zu werden – auch diese Aspekte sind potenzielle Einflussfaktoren auf die sozio-politische Akzeptanz.

Ein Vignetten-Experiment bietet sich als Methode an, da es folgende Vorteile bietet:

- Ähnlich wie bei einem DCE wird es durch die Bewertung mehrerer unterschiedlicher Vignetten pro Befragten möglich, den Einfluss von Eigenschaften der Befragten und der Politikmaßnahme (statistisch) isoliert voneinander zu analysieren.
- Hinsichtlich der Forschungsfrage ist ein Vignetten-Experiment zudem besser als ein DCE dazu geeignet, eine experimentelle Situation zu schaffen, die der realen Situation sehr ähnlich ist. Ein DCE würde es erfordern, dass die Befragten sich zwischen unterschiedlichen Politikmaßnahmen entscheiden – eine solche Entscheidungssituation kommt in der Realität in der Regel jedoch nicht vor. Das Vignetten-Experiment erlaubt es dagegen, eine Situation nachzubilden, in der jemand einen Zeitungsartikel über eine Politikmaßnahme liest und sich währenddessen eine Meinung dazu bildet.

Die hierarchische Datenstruktur, die aus einem Vignetten-Experiment resultiert (Befragte als Makro-Ebene, Vignetten als Mikro-Ebene), ermöglicht Auswertungen, durch die sich die beiden Zielsetzungen der empirischen Analyse erreichen lassen. Dies lässt sich an den in Abbildung 2 dargestellten Beispielen verdeutlichen.

Abbildung 2: Beispiele für mögliche Ergebnisse aus Vignetten-Experiment



In Beispiel 1 im linken Teil von Abbildung 2 sind mögliche Zusammenhänge zwischen der (steuerbedingten) Preiserhöhung konventioneller Energieträger und der erwarteten materiellen Belastung dargestellt. Sollte sich ein Zusammenhang wie die gelb eingezeichnete Linie finden, wäre dies ein Beleg dafür, dass eine (steuerbedingte) Preiserhöhung konventioneller Energieträger dazu führt, dass die Befragten die Maßnahme als (materiell) belastender wahrnehmen, was sich wiederum auf die Akzeptanz der Maßnahme auswirken könnte. Ein solches Ergebnis würde zur Erreichung der ersten Zielsetzung – der Identifikation von relevanten Einflussfaktoren – beitragen. Ebenso wäre es möglich, dass der Zusammenhang für Befragte mit einem überdurchschnittlich hohen Energieverbrauch stärker ausfällt (rote Linie). Ein solches Ergebnis würde die Identifikation von Subgruppen mit unterschiedlicher Bedeutung der relevanten Einflussfaktoren erlauben – in diesem Fall wäre die (steuerbedingte) Preiserhöhung für Befragte mit hohem Energieverbrauch wichtiger als für Befragte mit durchschnittlichem Energieverbrauch.

In Beispiel 2 im rechten Teil von Abbildung 2 sind mögliche Zusammenhänge zwischen der (steuerbedingten) Preiserhöhung konventioneller Energieträger und der Bewertung der Fairness der Politikmaßnahme dargestellt. Bei einem Zusammenhang entsprechend der violett eingezeichneten Linie würde das Ergebnis belegen, dass (steuerbedingte) Preiserhöhungen von den Befragten als unfair betrachtet werden – je höher die Preiserhöhung, desto geringer die wahrgenommene Fairness der Politikmaßnahme. Sofern die wahrgenommene Fairness signifikanten Einfluss auf die Zustimmung zu der Politikmaßnahme hat, würde auch ein solches Ergebnis Aufschluss über die grundsätzlichen Einflussfaktoren auf die sozio-politische Akzeptanz geben (Zielsetzung 1). Die blau eingezeichnete Linie wäre ein Beispiel für unterschiedliche

Wahrnehmungen von Politikmaßnahmen. Beide Linien haben zwar die gleiche Steigung – für Befragte mit „durchschnittlicher“ politischer Einstellung und „linke“ Befragte unterscheidet sich der Zusammenhang zwischen dem Ausmaß der Preiserhöhung und der wahrgenommenen Fairness nicht (je höher, desto unfairer). Jedoch würden „linke“ Befragte in diesem Beispiel die Politikmaßnahme, ceteris paribus, per se als unfairer wahrnehmen als Befragte mit „durchschnittlicher“ politischer Einstellung.

Die beiden Beispiele lassen sich auch auf mögliche Zusammenhänge zwischen sozialer Norm, erwarteter materieller Belastung, erwarteter Wirksamkeit und wahrgenommener Fairness der Politikmaßnahme auf der einen und der Zustimmung zu der Politikmaßnahme auf der anderen Seite übertragen. So könnte es beispielsweise sein, dass die erwartete Wirksamkeit der Politikmaßnahme einen umso stärkeren Effekt auf deren Akzeptanz entfaltet, je umweltbewusster ein Befragter ist (analog zu Beispiel 1). Ebenso könnte es sein, dass Befragte mit geringem Vertrauen in öffentliche Institutionen per se eine geringere Akzeptanz von Politikmaßnahmen aufweisen (analog zu Beispiel 2). Durch derartige Analysen soll eine empirische Grundlage dafür geschaffen werden, die Heterogenität der Bürger bei der Modellierung mit PANDORA realitätsnah abzubilden.

2.3.2 Einbindung der Ergebnisse in PANDORA

Beim Modell PANDORA handelt es sich um ein agentenbasiertes Modell (ABM), welches individuelle Akzeptanzprozesse modelliert, die sich angesichts einer möglichen Politikmaßnahme abspielen.

ABM werden häufig für die Modellierung theoretischer Fragestellungen angewendet. Jedoch profitiert ein ABM durch die Integration von empirischem Wissen in die Modellierungspraxis. Diese empirischen Daten können qualitativ, quantitativ, experimentell oder partizipativ erhoben werden. Dies ist sowohl für die Spezifikation der Parameter für die heterogenen Akteure als auch für die Validierung des Modells auf konzeptioneller Ebene von Bedeutung. Bei der konzeptionellen Validierung wird festgestellt, ob die Theorien und Annahmen, die dem konzeptionellen Modell zugrunde liegen, korrekt sind und der beabsichtigte Zweck des Modells erfüllt wird.

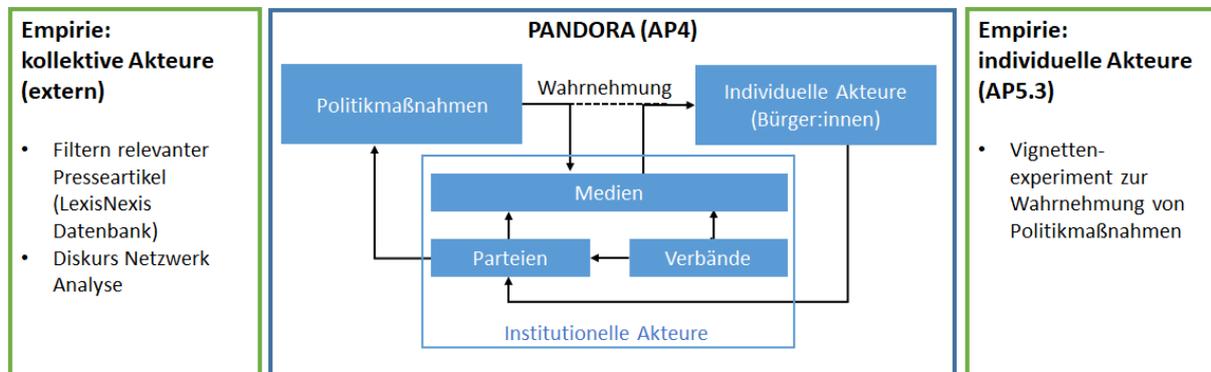
Die konzeptionelle Entwicklung von PANDORA erfolgt in weiten Teilen analog zur Konzipierung des oben beschriebenen Vignetten-Experiments, sodass die Ergebnisse aus der empirischen Untersuchung direkt als Input in das Modell integriert werden können.

Über das Vignetten-Experiment werden Parameter erfasst, um den Akzeptanzprozess der individuellen Akteure im Modell abbilden zu können (Abbildung 1). Der Fragebogen erfasst zudem soziodemographische und sozio-psychologische Daten der Befragten, welche zur Abbildung der Heterogenität der individuellen Akteure genutzt werden können. Darüber hinaus wird über das Experiment ermittelt, ob und zu welchem Umfang einzelne Faktoren auf die Akzeptanz von Politikmaßnahmen einwirken. Auch dieses Wissen fließt in die Struktur des Modells ein, um die Hierarchisierung der wichtigsten Einflussparameter auf die Akzeptanz von Politikmaßnahmen vorzunehmen.

Darüber hinaus beinhaltet das Modell neben den individuellen Akteuren auch institutionelle Akteure. Wir gehen davon aus, dass die Bürger:innen im Normalfall ihre Information über bevorstehende politische Maßnahmen nicht direkt aus erster Hand, sondern über die Berichterstattung in den Medien oder über andere Kommunikationskanäle (beispielsweise von Verbänden) erhalten. Über Medien können Verbände und Parteien über die Art und Weise der Berichterstattung bestimmte Aspekte der Politikmaßnahme hervorheben oder herunterspielen, was wiederum die Aufnahme und Akzeptanz bei den Bürger:innen beeinflussen könnte. Innerhalb des Modells wird dieser Einfluss der Medien auf die individuellen Akteure abgebildet. Die Parametrisierung der institutionellen Akteure erfolgt an dieser Stelle über eine umfassende Analyse von Presseartikeln (Abbildung 3). Um einen Datensatz relevanter Presseartikel zu erstellen, wird über die Datenbank

LexisNexis anhand festgelegter Suchbegriffe der Zeitraum 2015–2019 überprüft. Anschließend werden die ausgewählten Artikel mittels einer Diskurs-Netzwerkanalyse systematisch analysiert.

Abbildung 3: Empirischer Input für das agentenbasierte Modell PANDORA



3 Modellintegration

Im Folgenden werden die geplanten Schnittstellen zwischen den verwendeten Modellen genauer erläutert. Detaillierte Modellbeschreibungen der einzelnen Modelle sind im Anhang zu finden. Diese entsprechen den Pfeilen aus Abbildung 1.

3.1 Schnittstellen zwischen PANDORA, den Modellen SKIN, Invert/TAM und den Energiesystemmodellen: Definition politischer Szenarien mit den Ergebnissen aus PANDORA

Das Hauptziel von PANDORA ist es, die sozio-politische Akzeptanz und somit auch die gesellschaftliche Durchsetzbarkeit von unterschiedlichen Politiken zu ermitteln. Dies ist besonders dann relevant, wenn als gesellschaftliches Ziel angenommen wird, dass bestimmte Effizienz- und Emissionsziele so erreicht werden sollen, dass die zugrundeliegenden Maßnahmen in der Bevölkerung eine möglichst große Akzeptanz erfahren. PANDORA wird dabei unterstützen, Politik-szenarien so zu konstruieren, dass diese als Rahmenbedingung in die techno-ökonomischen Modelle einfließen können. Einerseits können für ein Politik-szenario Maßnahmenpakete so definiert werden, dass sie die höchste sozio-politische Akzeptanz erfahren. Andererseits können Politikmaßnahmen auf ihre gesellschaftliche Akzeptanz getestet werden. Die Politikinstrumente werden als übergeordnete Rahmenbedingung vorgegeben. Diese werden dann als Vorgaben für erneuerbare Energien oder Energieeffizienz, die direkt durch minimale oder maximale Kapazitätsgrenzen definiert sind, einbezogen. Beispielsweise können Steuern, wie zum Beispiel Kohlenstoffsteuern, auf den Verbrauch von kohlenstoffemittierenden Brennstoffen erhoben und die Auswirkungen auf die Akzeptanz innerhalb bestimmter Akteursgruppen analysiert werden. Zudem können politische Parameter in Bezug auf die Akzeptanz durch Diskontraten einbezogen werden. Eine weitere Möglichkeit wäre, sozio-politische Akzeptanz über eine zeitliche Verzögerung der Implementierung der Maßnahme auszudrücken und somit die Folgen dieser Verzögerung mit einem techno-ökonomischen Modell zu analysieren.

3.2 Schnittstelle zwischen dem SKIN Modell, den Energiesystemmodellen REMod und TIMES und dem Strommarktmodell ENERTILE

3.2.1 Marktanteile, installierte Leistungen

Der wesentliche Treiber im SKIN-Modell ist der Verkauf von Produkten. Produkte werden von Unternehmen auf Basis einer verfügbaren Wissenskombination hergestellt. Die Agenten sind etablierte kleine oder große Unternehmen oder auch Start-ups verschiedener Art, die sich auch im Modell als neue Agenten bilden. Die Unternehmen stellen so lange Produkte her, wie diese erfolgreich am Markt verkauft werden können. Können keine Erlöse mehr generiert werden, passen sie den Preis an, kombinieren sie ihr Wissen neu, ergänzen ihr Wissen durch Wissensaustausch oder bringen ihr Wissen in Konsortien ein, um neue Produkte zu entwickeln. Im Modell werden Ressourcen, Zwischenprodukte und Endprodukte unterschieden. Die Nachfrage nach den ersten beiden ergibt sich dabei indirekt aus der Nachfrage nach den Endprodukten.

Um diese Mechanismen modellieren zu können, müssen Annahmen über die relevanten Märkte, auf denen die Endprodukte abgesetzt werden, getroffen werden. Diese sind explizit nicht Teil des SKIN-Modells. Letztendlich werden Größen benötigt, aus denen Annahmen über die Nachfrage in Form von Menge und Preis der verkaufbaren Produkte (gegebenenfalls auch in Abhängigkeit ihrer Eigenschaften wie Leistungsfähigkeiten in bestimmten Parametern) getroffen werden können. Hierzu werden aus den Energiesystemmodellen Aussagen über die Marktnachfrage nach

bestimmten Produkten, ihrem Marktanteil, der Gesamtzahl an (Neu-)Installationen sowie andere Größen, wie Breakeven-point der analysierten Produkte bzw. Produktionskosten und Preise/Kosten bzw. Marktanteile konkurrierender Produkte, relevant. Idealerweise entsteht in SKIN ein Produkt, welches am Markt angeboten und nachgefragt wird. Aufgrund der Modelldaten aus den anderen Modellen wird dann abgeleitet, ob das Produkt gekauft wird oder nicht. Eine möglichst geeignete Abbildung des Marktes mit Hilfe anderer Modelle ist eine wesentliche Grundlage für die Modellierung mit SKIN.

3.2.2 Verfügbarkeit, Technologien, Lernkurven, "Wissen"

Die Verfügbarkeit von Technologien sowie die Entwicklung von techno-ökonomischen Eigenschaften wie Kosten und technischen Leistungsfähigkeiten sind Eingangsgrößen in Energiesystemmodellen. Durch einen soften Austausch mit Technologiegenesemodellen wie SKIN kann für die Energiesystemmodelle REMod und TIMES sowie das Strommarktmodell ENERTILE die Berücksichtigung von Technologiegeneseprozessen realisiert werden. Dabei wird der über PANDORA vorgegebene politische Rahmen mit dem Modell SKIN in Hinblick auf die Auswirkungen auf die Technologien simuliert. Im Ergebnis können in Abhängigkeit verschiedener technologiepoltischer Rahmenbedingungen die technologischen Verfügbarkeiten der Technologien (zeitlich und mengenmäßig) im Modell sowie Lernkurven (technisch-ökonomische Charakterisierung der Technologien) variiert werden. Dabei wird SKIN dafür herangezogen, die Einflüsse bestimmter Politiken auf Verfügbarkeiten von Technologien und auf Lernkurven zu analysieren. Durch die Verwendung von SKIN können neben Einflüssen durch monetäre Rahmenbedingungen auch nichtmonetäre Aspekte, wie zum Beispiel die Struktur der inhaltlichen Gestaltung von Forschungs- und Entwicklungsprogrammen, aber auch Netzwerkmaßnahmen etc., die Auswirkung auf die Generierung und den Austausch von Wissen haben, berücksichtigt werden, was ohne eine solche Modellierung nicht möglich ist.

In MANIFOLD liegt der Fokus zunächst auf Wärmetechnologien in Privathaushalten. In dem Rahmen sollen Technologische Innovationssysteme von Brennstoffzellen-KWK und Wärmepumpen für Privathaushalte als innovative Technologien untersucht werden. Für diese und verwandte Technologien, wie große Brennstoffzellen-KWK-Anlagen und Groß-Wärmepumpen, die auf industrieller bzw. auf Stadtteil- oder Quartiersebene eingesetzt werden können, werden mit SKIN ergänzend entsprechende Simulationen durchgeführt.

3.3 Schnittstelle zwischen dem SKIN-Modell und dem Diffusionsmodell INVERT

3.3.1 Marktanteile

Wie bereits in Abschnitt 3.2.1 beschrieben, ist die externe Abbildung der Nachfrage für das SKIN-Modell wesentlich, da sich aus den daraus erzielbaren Erlösen die Gewinne berechnen und sich daraus die weiteren Aktivitäten der Agenten im Modell ergeben.

Wie bei den Energiesystemmodellen werden für die Berücksichtigung der Nachfrage in SKIN auch von Invert/ee-lab Daten zur Nachfrage der modellierten Technologien benötigt. Hier wird es vor allem um Wärmetechnologien gehen, die in Haushalten eingebaut werden. Die Nachfrage sollte möglichst nach den Eigenschaften der Technologien differenziert werden. Aufgrund des speziellen Marktes, bei dem Hauseigenschaften, Installateure und die Entscheidungen der einzelnen Haushalte wesentlich sind, kann aufgrund der agentenbasierten Modellierung die Schnittstelle hier detaillierter bzw. differenzierter als bei den Energiesystemmodellen gestaltet werden.

3.3.2 Verfügbarkeit, Technologien, Lernkurven

Wie die Energiesystemmodelle (siehe Abschnitt 3.2.2) benötigt auch Invert/ee-lab Aussagen zur Entwicklung der techno-ökonomischen Parameter der Technologien in Abhängigkeit von den betrachteten Politiken. Interessant sind hier unter anderem Investitionskosten, Jahresnutzungsgrade in Abhängigkeit von der Vorlauftemperatur, Kostenkurven für Technologien und Energieträgerwechselkosten. Auf diese Weise können Einflüsse von Politiken auf die Entwicklung der Technologien berücksichtigt werden, die bisher nicht Teil der Modellierung waren. Neben Lernkurven wird bei der Schnittstelle zu Invert/ee-lab aber auch der Wissensstand und damit das Portfolio der Installateure als wesentlicher Punkt für die Diffusion der Technologie gesehen. Aus diesem Grund wird SKIN erweitert, um Dynamiken in der Lehre und Weiterbildung von Installateuren in Abhängigkeit verschiedener Politiken abzubilden. Dazu ist geplant, technologische Portfolien von Installateuren als Ergebnis ihres Wissens in Abhängigkeit der Aktivitäten von Geräteanbietern und Politik im Bereich von Schulungen sowie Einflüsse der Anbieter auf die Installateure unter anderem über Fachpartnerschaften zu modellieren. Invert/ee-lab bekommt dann die einzelnen Technologieportfolien bzw. Dichte von Installateuren mit bestimmten Portfolien, ggf. auch differenziert nach verschiedenen Regionen in Deutschland, übergeben. Dabei wird der neue Teil von SKIN an die Datenbedarfe von Invert/ee-lab angepasst werden. Die Abbildung und Modellierung der Installateure in Invert/ee-lab wird auch dahingehend weiterentwickelt, dass Lernraten entsprechend der Erkenntnisse aus dem SKIN-Modell abgebildet werden können.

3.4 Schnittstelle zwischen den Diffusionsmodellen INVERT/TAM, den Energiesystemmodellen REMod und TIMES und dem Strommarktmodell ENERTILE

3.4.1 Commodity- (auch Strom-), CO₂-Preise, Emissionsfaktoren

Output aus den Energiesystemmodellen (REMod, TIMES) und dem Strommarktmodell ENERTILE sind unter anderem kostenbasierte Energieträger- und CO₂-Preise frei Verbraucher, die als Input in die Diffusionsmodelle verwendet werden können, um die wirtschaftliche Anlegbarkeit unterschiedlicher Technologien ermitteln zu können. Output aus den Modellen REMod und ENERTILE sind stündliche CO₂-Emissionsfaktoren des Strommixes bis zum Jahr 2050, die sich aufgrund des Kraftwerkseinsatzes ergeben. Diese sind wiederum eine wichtige Eingangsgröße in den Diffusionsmodellen, um die CO₂-Emissionen bestimmen zu können. Daher ist an dieser Stelle ein Datenaustausch zwischen den Modellen von Mehrwert.

3.4.2 Marktanteile, Verbräuche

Aus den Energiesystemmodellen REMod und TIMES und dem Strommarktmodell ENERTILE resultieren kostenminimale Technologiemixe, da das gesamte Energiesystem bzw. das Stromsystem hinsichtlich der Minimierung der Systemkosten optimiert wird. Eine Kopplung mit Marktdiffusionsmodellen wie Invert oder TAM ermöglicht es, das Investitionsverhalten von Akteuren beispielsweise in Heiztechnologien detailliert und unter Berücksichtigung weiterer entscheidungsrelevanter Faktoren unter einem über die Szenariencharakterisierung bzw. PANDORA gegebenen politischen Rahmen abzubilden. Die Modellkopplung sieht im Detail vor, dass die Marktanteile sowie Sanierungsraten als Ergebnis der Marktdiffusionsmodelle in die Energiesystemmodelle als Korridor (also als Nebenbedingung) eingehen. Der Mehrwert, der sich durch das gezeigte Vorgehen ergibt, ist im Ergebnis eine Bewertung des Effektes, der sich durch das Investitionsverhalten in einem bestimmten Sektor auf einen anderen Sektor ergibt.

4 Referenzen

Senkpiel, C.; Dobbins, A.; Kockel, C.; Steinbach, J.; Fahl, U.; Wille, F.; Globisch, J.; Wassermann, S.; Droste-Franke, B.; Hauser, W.; Hofer, C.; Nolting, L.; Bernath, C. (2020): Integrating Methods and Empirical Findings from Social and Behavioural Sciences into Energy System Models — Motivation and Possible Approaches. In: *Energies* 13, 4951.
<https://doi.org/10.3390/en13184951>

A.1 Annex - Modellbeschreibungen

A.1.1 Modellbeschreibung PANDORA

Das agentenbasierte Modell PANDORA befindet sich zum aktuellen Zeitpunkt in Entwicklung.

A.1.2 Modellbeschreibung SKIN

Das Modell SKIN (Simulating Knowledge in Innovation Networks)-Energy, das im Projekt verwendet wird, basiert auf dem SKIN-Basismodell von Gilbert et al. (2010). SKIN wurde bereits vielfach im Kontext der Innovationsforschung in Unternehmensnetzwerken angewandt und stellt ein anerkanntes Verfahren in diesem Bereich dar. Mit SKIN-Energy wurde das Modell um einige Funktionalitäten erweitert, um es konkreter auf Technologieinnovationsprozesse anzupassen (vgl. Droste-Franke et al. 2020).

Wissensgenese und Wissensaustausch sind zentrale Elemente von SKIN. In dem agentenbasierten Modell interagieren Agenten mit heterogenen Eigenschaften in einer sich kontinuierlich verändernden Umgebung. Agenten im Modell sind vor allem Firmen und Forschungsinstitutionen, zum Beispiel im Bereich der Entwicklung von Wärmepumpen. Firmen produzieren und verkaufen innovative Güter, wie Wärmepumpen oder deren Vorprodukte. Dazu benötigen sie Wissen und Inputs von anderen Agenten. Dies umfasst Wissen aus Forschung und Entwicklung anderer Firmen und Forschungsinstitute, aber auch praktisches Wissen für eine effiziente Produktion und über benötigte Vorprodukte bzw. Ressourcen. Durch Forschung und Produktionskooperation können Firmen entsprechendes Wissen generieren. So können Wärmepumpen durch den Einsatz neuer Materialien oder eines neuen Designs effizienter gestaltet werden. Forschungsinstitutionen forschen dabei in geförderten Projekten, vermehren so ihr Wissen und tauschen es unter anderem mit Firmen als Projektpartner aus. Findet eine Wärmepumpe keinen Absatz, senkt die Firma den Preis. Das Modell SKIN-Energy enthält zusätzlich zum Basismodell folgende wesentlichen Aspekte, die für typische Fragen im Energiebereich wichtig sind: Zur Darstellung des Wissens wird eine Mengendarstellung verwendet, die Berechnung der Expertise von Agenten und Qualität von Produkten ist wesentlich verfeinert, Prozesse öffentlicher Förderung von Forschungsprojekten sind abgebildet, Start-up-Prozesse werden differenziert implementiert, große Firmen und Konglomerate sind abbildbar, der Produktraum ist stärker in Richtung Wertschöpfungskette strukturiert, Produktmengen werden modelliert und Produktcharakteristiken sowie Märkte werden spezifisch abgebildet.

Um die Auswirkungen von Maßnahmen auf Struktur und Dynamik von Innovationsnetzwerken zu analysieren, werden diese im Rahmen von Simulationsexperimenten in SKIN implementiert. Maßnahmen können dabei direkt darauf abzielen, bestimmte Funktionalitäten eines Innovationssystems zu verbessern. Eine Maßnahme könnte es zum Beispiel sein, die Zusammenarbeit und Kommunikation entlang der Wertschöpfungskette (zum Beispiel zwischen Wärmepumpenherstellern und den Zulieferern) bzw. quer dazu (zum Beispiel unter bestimmten Zulieferern) und damit den Wissensaustausch zwischen den jeweiligen Akteuren zu verstärken.

Referenzen

Droste-Franke, B.; Fohr, G.; Voge, M.; Nietgen, T.; van Doren, D.; Weidle, M.; O'Sullivan, M.; Deissenroth, M.; Nitsch, F.; Jacqué, K. (2020): Simulation von Innovationsdynamiken neuer Schlüsseltechnologien im Energiebereich am Beispiel von Lithium-Batterien, final report. Bad Neuenahr-Ahrweiler: IQIB GmbH.

Gilbert, N.; Ahrweiler, P.; Pyka, A. (2010): The SKIN (Simulating Knowledge Dynamics in Innovation Networks) model. University of Surrey, University College Dublin, University of Hohenheim.

A.1.3 Modellbeschreibung INVERT

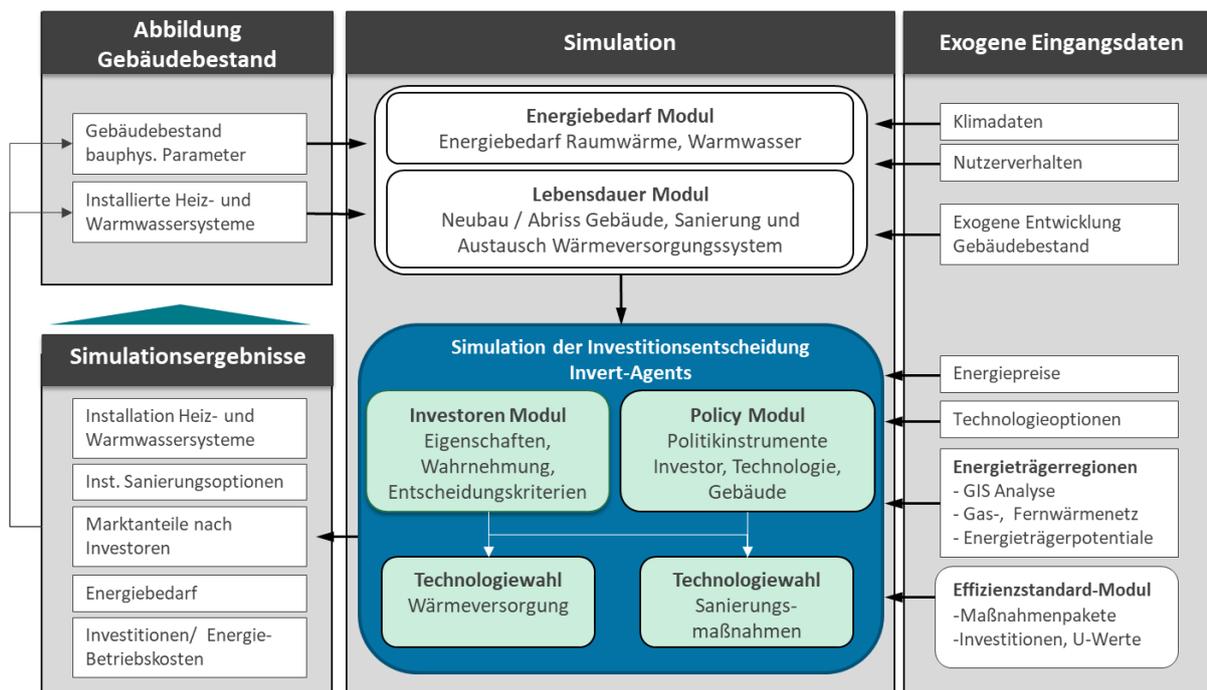
Methodisch stellt INVERT/EE-Lab ein dem Bottom-up-Ansatz folgendes, techno-ökonomisches Simulationsmodell dar, mit dem Optionen des Energiebedarfs und dessen Deckung für Wärme (Raumwärme und Warmwasser) sowie Klimatisierung von Wohn- und Nichtwohngebäuden ermittelt und die Auswirkungen verschiedener Förderinstrumente in Jahresschritten abgebildet werden können. Grundlage des Modells ist eine detaillierte Darstellung des Gebäudebestands nach Gebäudetypen, Baualtersklassen und Sanierungszuständen mit relevanten bauphysikalischen und ökonomischen Parametern einschließlich der Technologien zur Bereitstellung von Raumwärme, Warmwasser und Klimatisierung. Darauf aufbauend wird der Heiz- und Kühlenergiebedarf unter Einbeziehung von Nutzerverhalten und Klimadaten ermittelt. Die Investitionsentscheidung in Technologien und Effizienzmaßnahmen wird unter Berücksichtigung von investorenspezifischen Entscheidungskalkülen und Hemmnissen sowie Energieträgerpotenzialen im Modul INVERT-Agents ermittelt (vgl. Kranzl et al. 2013; Müller und Biermayer 2011; Steinbach 2013).

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. Im Rahmen des laufenden Forschungsprojektes *Diffusion EE* wird das Modell um den Bereich der Intermediäre als zentrale Change Agents erweitert, um den Einfluss auf die Investitionsentscheidung im Gebäudebereich abzubilden.

Für eine realitätsnahe Simulation des Einsatzes erneuerbarer Energien im Gebäudebereich werden unter anderem folgende relevante Zusammenhänge im Modell abgebildet:

- Berücksichtigung von investorenspezifischen Hemmnissen und Kalkülen bei der Investitionsentscheidung in Wärmeversorgungssysteme und Effizienzmaßnahmen.
- Das Temperaturniveau des Wärmeverteilungssystems wird in der Simulation berücksichtigt, besonders die Interaktion zwischen diesem und den Wirkungsgraden bzw. Arbeitszahlen der Bereitstellungstechnologien. Dies ist in besonderem Maße für eine realitätsnahe Simulation des Einsatzes von Wärmepumpen in älteren Gebäuden von Bedeutung.
- Die Modellierung der Energiebereitstellung aus solarthermischen Anlagen erfolgt auf monatlicher Basis unter Berücksichtigung der entsprechenden solaren Einstrahlung. Zudem wird die entsprechend der Geometrie der Referenzgebäude den solarthermischen Anlagen zur Verfügung stehende Dachfläche im Modell berücksichtigt.
- Politikinstrumente zur Förderung von EE-Wärme und Effizienzmaßnahmen wie Investitionszuschüsse (Marktanreizprogramm), Nutzungspflichten (EEWärmeG) oder haushaltsunabhängige Umlagesysteme werden technologie- und gebäudespezifisch (Neubau, Bestand, öffentliche Gebäude) definiert.
- Darüber hinaus erfolgt eine Berücksichtigung der Limitierung erneuerbarer Energieträger über definierte Kostenpotenziale inklusive deren Entwicklung über den Simulationszeitraum.

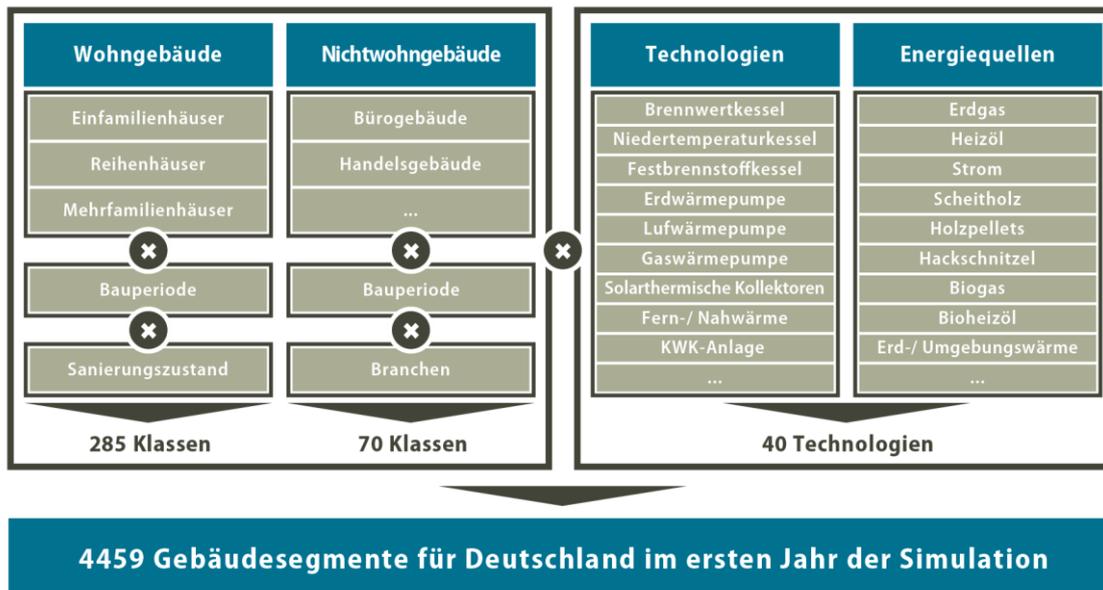
Abbildung 4: Struktur des Simulationsmodells Invert/EE-Lab (Quelle: Steinbach 2015)



Gebäudetypologische Abbildung von Referenzgebäuden und Wärmeversorgungs-technologien

Derzeit werden 40 verschiedene Technologien zur Bereitstellung von Raumwärme und Warmwasser unterschieden, welche über detaillierte technische und ökonomische Daten abgebildet werden. Die Referenzgebäudetypologie mit den entsprechenden Zuordnungen von Gebäuden und Technologien wird auf Basis der Erhebungen „Datenbasis Wohngebäude“ (Diefenbach et al. 2010) und deren Aktualisierung aus dem Jahr 2018 (Cischinsky und Diefenbach 2018) vorgenommen. Die Gebäudetypologie von Nichtwohngebäuden basiert ursprünglich auf der Studie „Energieverbrauch im Sektor Gewerbe, Handel, Dienstleistungen“ (Fraunhofer ISI et al. 2013) und wird derzeit mit den Daten aus dem Projekt dataNWG: Forschungsdatenbank Nichtwohngebäude (<https://www.datanwg.de>) aktualisiert. Der aus der Modellrechnung resultierende Energiebedarf ist auf die temperaturbereinigten Werte der Anwendungsbilanzen sowie der EE-Wärmebereitstellung nach AGEE-Stat kalibriert.

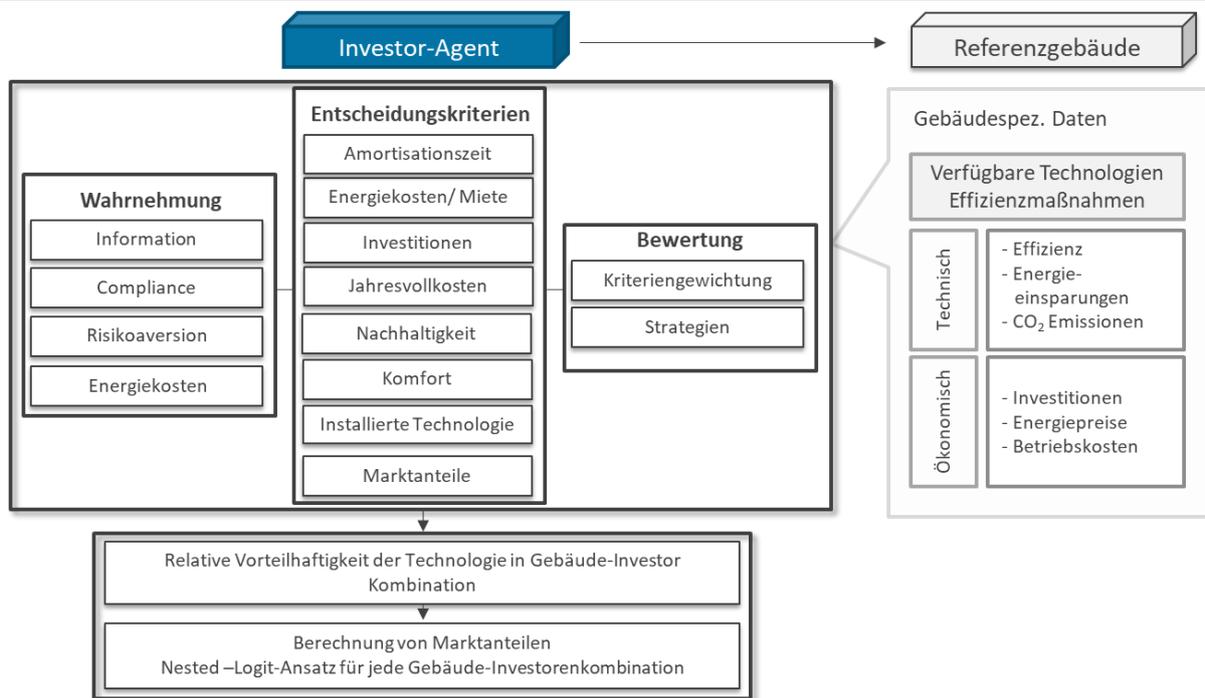
Abbildung 5: Struktur der hinterlegten Gebäudetypologie in Invert/ EE-Lab



Modellierung von Investoren im Gebäudebereich

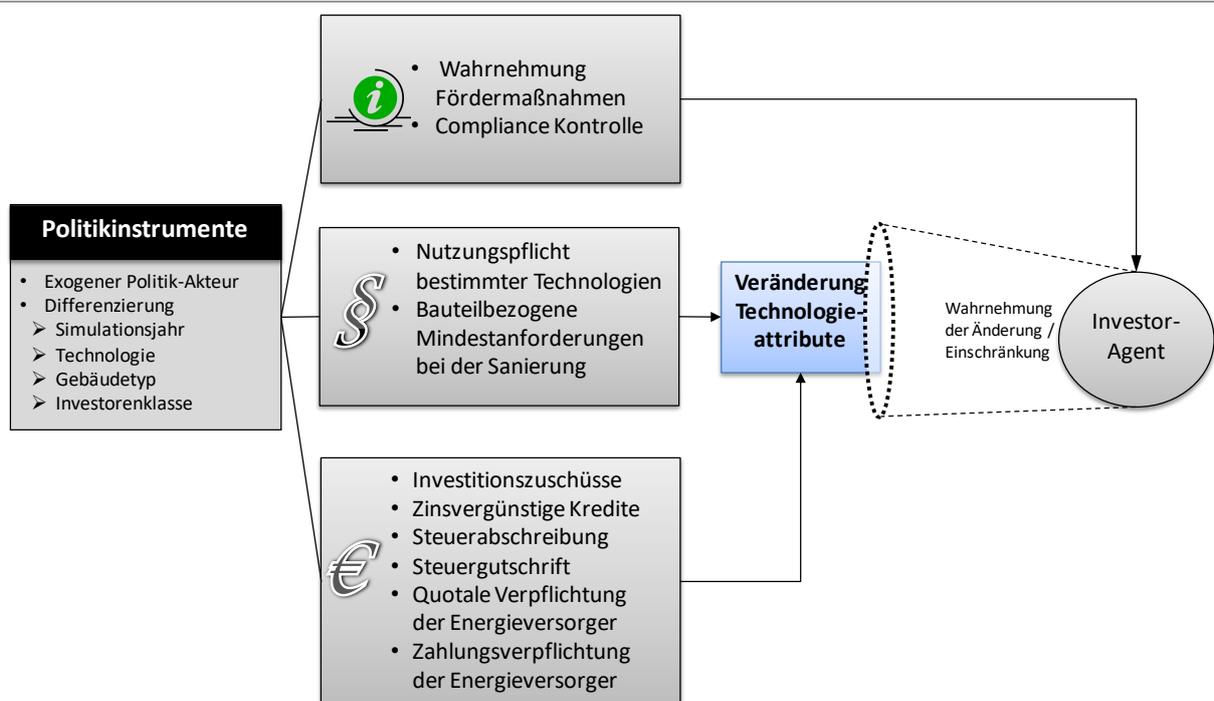
Im Modell können einzelne Investorentypen implementiert werden, welche den Referenzgebäudesegmenten anteilig als Besitzer zugeordnet werden. Diese Anteile sind zeitabhängig und können somit exogen über den Simulationszeitraum verändert werden. Das Modell erlaubt die Definition beliebig vieler Investorenagenten, welche jeweils Instanzen einer von fünf möglichen Agentenklassen darstellen – *Selbstnutzende Eigentümer*, *Private Vermieter*, *Eigentümergeinschaften*, *Wohnungsbaugesellschaften*, *gewerbliche Gebäudebesitzer*. Als Grundlage der Investitionsentscheidung werden verschiedene ökonomische und nichtökonomische Entscheidungskriterien definiert, die für jede Kombination von Investoren, Referenzgebäudesegmenten und Technologieoptionen individuell ermittelt werden. Die Eigenschaften einer Investoreninstanz werden als Eingangsdaten definiert, womit einerseits die Relevanz unterschiedlicher Entscheidungskriterien über Gewichte bestimmt werden, andererseits auch die Ausprägung der Kriterien beeinflusst werden. Somit wird sowohl die Art der Investitionsentscheidung – Berücksichtigung unterschiedlicher Kriterien – als auch die Wahrnehmung der Technologieoptionen und der damit verbundenen Parameterausprägungen unterschieden. Für jede zur Verfügung stehende Technologieoption werden in jedem Referenzgebäudesegment aus Sicht jeder Investoreninstanz Nutzwerte berechnet, auf deren Basis die Marktanteile mit einem *Nested-Logit-Modell* ermittelt werden.

Abbildung 6: Modellierung von Politikinstrumenten



Um die Wirkung der Politikinstrumente auf die Investitionsaktivität in Energieeffizienzmaßnahmen und Wärmeversorgungssysteme zu untersuchen, werden diese explizit im Modell abgebildet. Dies geschieht als integrale Modellierung von Politikinstrumenten und Investoren, die eine aktors-spezifische Untersuchung der Wirkungen der Instrumente ermöglichen sollen (Abbildung 7).

Abbildung 7: Schematische Darstellung der Modellierung von Politikinstrumenten in Invert-Agents (Quelle: Steinbach, 2015)



Die Politikinstrumente und deren Ausgestaltung werden zunächst aus Sicht eines Politik-Akteurs für jedes Simulationsjahr exogen definiert. Dabei werden Förder- und Anforderungsbedingungen

nach den adressierten Technologien und Maßnahmen sowie den Adressaten – Investorenklassen und Gebäudetypen differenziert. Ordnungsrechtliche und finanzielle Fördermaßnahmen verändern die Attribute der Technologiealternativen oder schränken die Wahlmöglichkeiten durch Nutzungspflichten oder Mindestanforderungen ein. In Abhängigkeit der definierten Investor-Agenten werden diese Veränderungen oder Einschränkungen bei der Investitionsentscheidung berücksichtigt. Ein Investitionszuschuss beispielsweise verändert die relative Vorteilhaftigkeit einer Technologie hinsichtlich des Attributes Investitionen, wobei dies nicht zwangsläufig der wahrgenommenen Attributausprägung eines Investor-Agenten entspricht. Informativische Maßnahmen wiederum wirken indirekt auf die Attribute der Wahlmöglichkeiten, indem die investorenspezifische Wahrnehmung verändert wird.

Webseite Modell

www.invert.at

Referenzen:

- Kranzl, I.; Anagnostopoulos, F.; Aichinger, E.; Müller, A.; Staniaszek, D.; Steinbach, J.; Toleikyte, A. (2016): Energy Saving Cost Curves for the Case of the German Building Stock. In: 14. Symposium Energieinnovation an der Technischen Universität Graz. Graz, Austria. Retrieved (<https://www.tugraz.at/events/eninnov/nachlese/download-beitraege/stream-f/#c36892>).
- Kranzl, L.; Hummel, M.; Müller, A.; Steinbach, J. (2013): Renewable heating: perspectives and the impact of policy instruments. In: Energy Policy 59, pp. 44–58. Retrieved June 10, 2013 (<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0301421513002280>).
- Müller, A. (2015): Energy Demand Assessment for Space Conditioning and Domestic Hot Water: A Case Study for the Austrian Building Stock. Wien: Technische Universität Wien.
- Remme, U. (2006): Zukünftige Rolle erneuerbarer Energien in Deutschland: Sensitivitätsanalysen mit einem linearen Optimierungsmodell, IER Forschungsberichte, Band 99.
- Steinbach, J. (2015): Modellbasierte Untersuchung von Politikinstrumenten zur Förderung erneuerbarer Energien und Energieeffizienz im Gebäudebereich. Edited by Fraunhofer ISI. Stuttgart: Fraunhofer Verlag. Retrieved (<https://www.verlag.fraunhofer.de/bookshop/buch/Modellbasierte-Untersuchung-von-Politikinstrumenten-zur-Förderung-erneuerbarer-Energien-und-Energieeffizienz-im-Gebäudebereich/245046>).

Referenzen (Datengrundlage Gebäude):

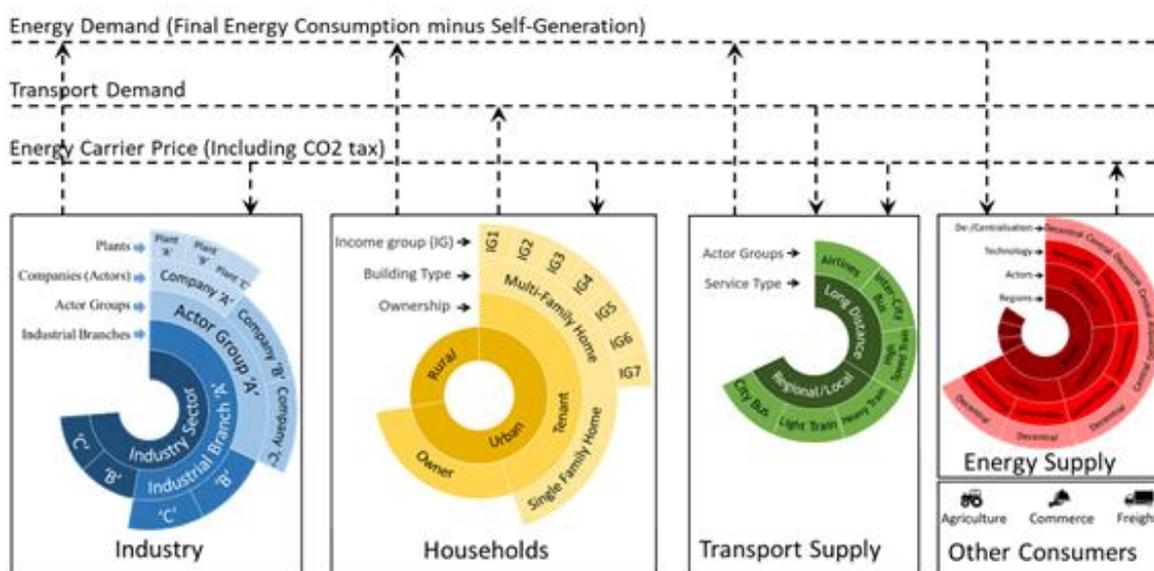
- Cischinsky, H.; Diefenbach, N.; Rodenfels, M. (2018): Datenerhebung Wohngebäudebestand 2016. Anleitung zur Durchführung von Auswertungen mit der Auswertungsdatenbank.
- Clausnitzer, K.-D.; Jahnke, M.; Rohde, C.; Steinbach, J. (2015): Datenerhebung Gebäudebestand – Erfassung von statistischen Basisdaten zum Nichtwohngebäudebestand und empirische Analyse der energetischen Qualität ausgewählter Gebäudetypen. Band II: Mengengerüst Nichtwohngebäude und energetische Eigenschaften.
- Diefenbach, N.; Cischinsky, H.; Rodenfels, M.; Clausnitzer, K.-D. (2010): Datenbasis Gebäudebestand - Datenerhebung zur energetischen Qualität und zu den Modernisierungstrends im deutschen Wohngebäudebestand. Darmstadt: Institut Wohnen und Umwelt (IWU).
- IWU et al (2020): Forschungsdatenbank Nichtwohngebäude (dataNWG). www.dataNWG.de.

Schlomann, BB.; Steinbach, J.; Kleeberger, H.; Geiger, B.; Pich, A.; Gruber, E.; Mai, M.; Schiller, W.; Gerspacher, A. (2014): Energieverbrauch des Sektors Gewerbe, Handel, Dienstleistungen (GHD) für die Jahre 2004 bis 2006. Stuttgart: Fraunhofer-Verlag. Retrieved from: (<https://portal.dnb.de/opac.htm?method=simpleSearch&cqlMode=true&query=idn%3D1049801253>).

A.1.4 Modellbeschreibung TAM

Das TIMES-Akteursmodell (TAM) basiert auf dem TIMES-Modellgenerator, beinhaltet aber die detailliertere Charakterisierung der verschiedenen Akteure innerhalb der Angebots- und Nachfragesektoren. TAM verwendet das gleiche Grundkonzept wie TIMES und zielt auf die Ermittlung der wirtschaftlich optimalen Struktur des Energiesystems bei einem vorgegebenen Nutzenergie- bzw. Energiedienstleistungsbedarf und ggf. energie- und umweltpolitischen Vorgaben. Die Komplexität des Modells wird jedoch durch die erhöhte Auflösung der verschiedenen Wirtschaftssektoren des Energiesystems erhöht: Energieversorgung, Industrie, Haushalte und Verkehr, während die restlichen Sektoren weiterhin aggregiert abgebildet sind, wie in Abbildung 8 dargestellt (Ahanchian et al. 2020).

Abbildung 8: Darstellung die abgebildeten Akteursgruppen in TAM (Quelle: Universität Stuttgart – IER)



Um die höhere Sektorauflösung zu ermöglichen, ohne die Rechenzeit des Modells unnötig zu erhöhen, werden die Sektoren in Einzelmodelle aufgeteilt und durch einen Kopplungsmechanismus verbunden, der durch Nachfragen aus den Nachfragesektoren und Preise für Energieträger aus dem Angebotssektor durch einen iterativen Prozess ermöglicht wird. Der TAM-Modellhorizont erstreckt sich von 2013 bis 2060 in jährlicher Auflösung mit 4 Regionen im Angebotssektor sowie jeweils eine Region auf Jahresbasis in den Nachfragesektoren. Die Eingaben in das Modell zielen darauf ab, die Versorgung der Nachfragesektoren mit Energiedienstleistungen zu minimalen globalen Kosten sicherzustellen, indem gleichzeitig Entscheidungen über Anlageninvestitionen und -betrieb, Primärenergieversorgung und Energiehandel für jede Region getroffen werden. Wenn beispielsweise die Energiedienstleistung für die Beleuchtung von Wohngebäuden im Vergleich zum Referenzszenario zunimmt (vielleicht aufgrund eines Rückgangs der Kosten für die Beleuchtung von Wohngebäuden oder aufgrund einer anderen Annahme für das Einkommenswachstum),

müssen entweder die vorhandenen Erzeugungsanlagen intensiver genutzt oder neue, möglicherweise effizientere Anlagen installiert werden. Die Auswahl der Erzeugungsanlagen (Typ und Brennstoff) durch das Modell basiert auf der modellintegrierten vergleichenden Analyse der Eigenschaften alternativer Erzeugungstechnologien, auf der Wirtschaftlichkeit der Energieversorgung und auf Umweltkriterien.

TAM berücksichtigt auch Budgetrestriktionen, die die Investitionen auf das tatsächlich verfügbare Kapital für die definierten Akteursgruppen begrenzt. Diese methodischen Erweiterungen verbessern die Einschätzung der möglichen angebots- und nachfrageseitigen notwendigen Veränderungen. Das entwickelte und angewandte Verfahren der Modellkopplung bietet eine ganzheitliche Sicht auf ein integriertes Energiesystem in seiner Gesamtheit mit einer verbesserten Darstellung der Akteure, womit anwendbare innovative Lösungen zur Reduktion der Treibhausgas-(THG)Emissionen erarbeitet werden können, die für die verschiedenen Akteure innerhalb der verschiedenen Sektoren relevant sind. Die Methodik eignet sich auch dazu, die Herausforderungen bei der politischen Koordination zwischen ähnlichen Akteuren zu bewältigen und die Konsistenz bei der Modellanwendung zur Definition CO₂-armer Transformationspfade zu erhöhen. Hiermit können die Akteure unter Berücksichtigung ihrer nichttechnischen Entscheidungskriterien gezielter bezüglich der Investitionsentscheidungen angesprochen werden, was die Kostenwirksamkeit bei der Erreichung der Ziele der Energiewende deutlich steigern kann.

Referenz:

Ahanchian, M.; Bailey, I.; Dobbins, A.; Tash, A.; Fahl, U. (2020): Optimale Struktur von dezentralen und zentralen Technologien im Systemverbund – Intelligente dezentrale Energiesysteme. Förderkennzeichen: 03ET4026. Schlussbericht. Institut für Energiewirtschaft und Rationelle Energieanwendung (IER), Universität Stuttgart. Verfügbar unter: https://www.ier.uni-stuttgart.de/forschung/projekte/abgeschlossen/dezentral/downloads/BMWi-03ET4026_Schlussbericht_Dezentral.pdf.

A.1.5 Modellbeschreibung ENERTILE

Das Modell ENERTILE ist ein am Fraunhofer ISI entwickeltes techno-ökonomisches Modell zur detaillierten Optimierung des Stromsystems und basiert auf der Methodik der linearen Optimierung. Das Modell konzentriert sich auf den Stromsektor, deckt aber auch die Wechselwirkungen mit anderen Sektoren (z. B. Wärme und Verkehr) ab. Es wird primär für Szenariostudien eingesetzt, um kostenminimale Entwicklungspfade zu ermitteln. Ein Fokus liegt auf der Analyse von Chancen und Herausforderungen bei steigenden Anteilen erneuerbarer Energien. Zur Integration erneuerbarer Energien wird zusätzliche Flexibilität innerhalb des Stromsektors oder auch eine stärkere Verknüpfung mit anderen Sektoren genutzt.

In Stromversorgungssystemen mit hohen Anteilen fluktuierender Erzeugung beeinflusst die Stochastik wetterabhängiger Wind- und Solarstromerzeugung die Auslegung des Systems signifikant. ENERTILE besitzt daher eine stündliche Auflösung und berechnet den kostenminimalen Erzeugungs- und Infrastrukturmix zu exogenen Strom- und Wärmenachfragen. Dazu wird sowohl der Ausbau als auch der Einsatz der fossilen und erneuerbaren Strom- und Wärmeerzeuger, der Stromnetze und der Energiespeicher optimiert. Der hohe Detailgrad in der Darstellung der erneuerbaren Energien ist eine zentrale Stärke des Modells.

Zu den derzeit modellierten Regionen gehören die Mitgliedsstaaten der Europäischen Union, das Vereinigte Königreich, die Schweiz, Norwegen, der Balkan und die Staaten der MENA-Region (Mittlerer Osten und Nordafrika). Die regionale Auflösung unterscheidet sich nach den betrachteten Aspekten. Während die Potenziale erneuerbarer Energien auf einem sehr feinen Flächengitter über die gesamte modellierte Region abgebildet werden, werden andere Aspekte, wie beispielsweise

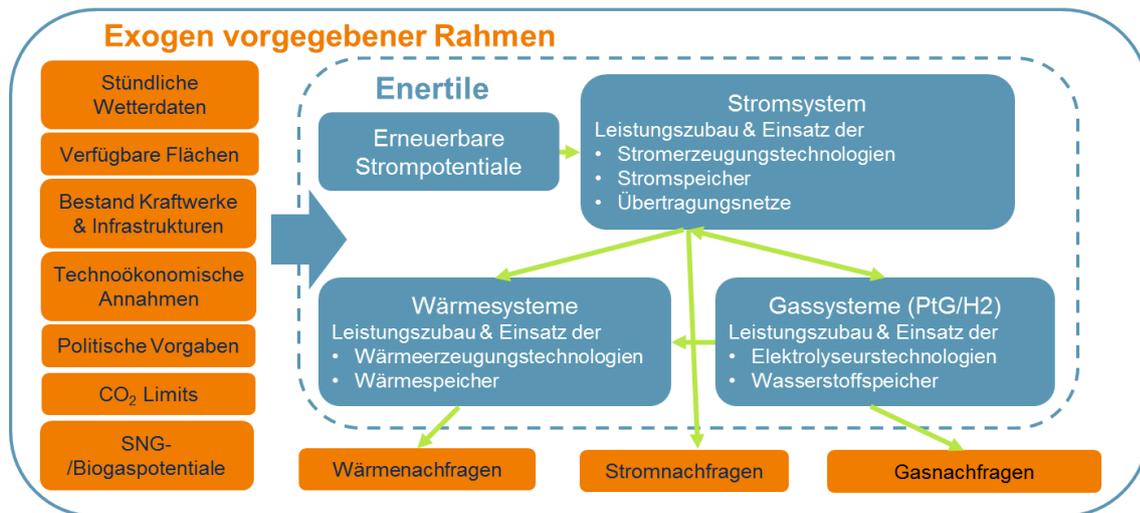
Energienachfragen, auf größere, zusammenhängende Modellregionen aggregiert, die sich an Netzengpässen im Stromübertragungsnetz und den Nationalstaaten orientieren. Innerhalb einer Modellregion findet innerhalb eines Modelllaufs keine weitere regionale Differenzierung statt.

Das lineare Optimierungsproblem wird typischerweise für die Stützjahre 2030, 2040, und 2050 in stündlicher Auflösung aufgestellt und gelöst. Dabei werden der Ausbau und der Einsatz der Infrastrukturen über alle Stützjahre unter perfekter Voraussicht in einem einzigen Modelllauf gemeinsam optimiert. Dies bedeutet, dass das Modell die Folgen einer Entscheidung im Jahr 2030 in den Folgestützjahren berücksichtigen muss. So wird gewährleistet, dass die Wechselwirkungen und Komplementaritäten zwischen Systemkomponenten voll erfasst werden und der für den gesamten Zeitraum kostenminimale Erzeugungs-, Übertragungs- und Speichermix bestimmt wird.

Die Deckung der exogenen und endogenen Nachfragen nach Strom, Wärme in Wärmenetzen und erneuerbaren Gasen in jeder Stunde eines Jahres wird über die zentralen Nebenbedingungen der Optimierung sichergestellt. Für jede Modellregion und jeden betrachteten Energieträger wird eine stundenscharfe Bilanzgleichung aufgestellt, die ausgeglichen sein muss. So müssen beispielsweise Stromangebot und -nachfrage für eine modellierte Region in jeder Stunde synchronisiert sein. Sektorenkopplungsoptionen, Energiespeicher und Netze schaffen Verbindungen zwischen einzelnen Bilanzgleichungen. Sektorenkopplungstechnologien wie beispielsweise Elektroheizkessel gehen mit unterschiedlichen Vorzeichen in der Strom- und Wärmebilanzgleichung einer Region in einer bestimmten Stunde ein. Speicher schaffen intertemporale Verbindungen zwischen den Bilanzgleichungen eines Energieträgers für unterschiedliche Stunden. Übertragungsstromnetze werden durch die Verknüpfung der Strombilanzräume unterschiedlicher Regionen für einen Zeitpunkt realisiert. Somit kann ENERTILE im Rahmen der Optimierung ein sehr detailliertes Abbild der gegenseitigen Abhängigkeiten bei der Optimierung des gesamten angebotsseitigen Energiesystems liefern.

Die Modellierung des Wärmesektors in ENERTILE umfasst dezentrale Wärmepumpen sowie Wärmenetze mit multivalenter Wärmeerzeugung. Der durch Wärmepumpen und in Wärmenetzen gedeckte Wärmebedarf wird exogen vorgegeben. Diese Vorgaben basieren beispielsweise auf Ergebnissen des Modells Invert/EE-Lab. Ein dezentrales Wärmepumpensystem besteht aus einem Gebäude mit einem definierten Wärmebedarf, einer Wärmepumpe und einem Wärmespeicher. Die Deckung der Stromnachfrage ist ebenso wie die Verlagerung der Stromnachfrage der Wärmepumpen mithilfe des Wärmespeichers Teil des Optimierungsproblems. Für die Deckung des Wärmebedarfs in Wärmenetzen stehen Kraft-Wärme-Kopplungsanlagen (KWK), Gaskessel, Elektrokessel, Großwärmepumpen und Wärmespeicher zur Verfügung. Die Investition und der Einsatz der Wärmeerzeugungstechnologien in Wärmenetzen ist direkt in die Systemoptimierung integriert.

Abbildung 9: Modellrahmen ENERTILE (Quelle: Fraunhofer ISI)



A.1.6 Modellbeschreibung REMOD

Die grundlegende Idee des Modells REMod-D basiert auf einer kostenbasierten Strukturoptimierung der Transformation des deutschen Energieversorgungssystems für alle Verbrauchssektoren – also die Sektoren Strom, Niedertemperaturwärme (Raumwärme und Warmwasser), Prozesswärme und Verkehr. Ziel dieser Rechnungen ist es, einen kostenoptimierten Transformationspfad vom heutigen System hin zu einem Energiesystem im Jahr 2050 zu bestimmen, wobei auf dem gesamten Weg eine für jedes Jahr vorgegebene Obergrenze erlaubter CO₂-Emissionen über alle Sektoren hinweg nicht überschritten wird.

Die Modellrechnungen beschreiben technisch mögliche Entwicklungspfade des Energiesystems mit allen dazugehörigen Systemkomponenten (wie Wandler, Speicher, Netze und Fahrzeugparks) und optimieren diese in Bezug auf die Minimierung der Gesamtkosten des deutschen Energiesystems auf Basis der getroffenen Annahmen und des Analyserahmens. Anspruch der Rechnungen ist es nicht zu beschreiben, wie die Zukunft aussehen wird, sondern die Frage zu beantworten, wie die Entwicklung von Gesamtsystemen aussehen kann, bei der möglichst geringe Gesamtkosten anfallen und zugleich die erwünschte Minderung der energiebedingten CO₂-Emissionen erreicht und die Energiebilanz zu jedem Zeitpunkt eingehalten wird.

Die notwendigen Eingangsdaten enthalten unter anderem Annahmen zu Kosten und Leistungsdaten einzelner Technologien. Zur Berechnung der stündlichen Energiebilanzen sind Wetterdaten und Last- und Erzeugerprofile für fünf historische Wetterjahre (2011–2015) hinterlegt. Das Modell berücksichtigt zwar geographisch aufgelöste Wetterinformationen, jedoch werden Energienachfrage, -erzeugung und -verteilung nicht räumlich aufgelöst. Kosten für benötigte Infrastruktur (zum Beispiel Netze) werden mittels eines Aufschlags für jede Anwendungstechnologie proportional zu deren Ausbau berücksichtigt. Dies kann im Hinblick auf notwendige Investitionsvolumen Verzerrungen erzeugen, da dadurch diese – im Vergleich zur Realität – zeitlich verzögert dargestellt werden.

Als Stromerzeuger stehen dem Modell verschiedene konventionelle Kraftwerke und Erneuerbare-Energien-Anlagen zur Verfügung. Biomasse kann in unterschiedlichen Nutzungspfaden entweder direkt oder nach Umwandlung in einen anderen Energieträger verwertet werden. So kann zum Beispiel Holz in Kesseln für die Industrie zur Bereitstellung von Prozesswärme verwendet werden oder zur Erzeugung von Niedertemperaturwärme im Gebäudesektor. Als Anlagen zur Umwandlung von Biomasse sind des Weiteren Biogasanlagen, Anlagen zur Einspeisung von Biogas in das Erdgasnetz, Vergaser-Anlagen mit anschließender Konversion des Synthesegases in Wasserstoff,

Methan oder flüssige Brennstoffe und Biodieselanlagen implementiert. Dem Modell stehen stationäre und mobile (Nutzung von Batterien batterieelektrischer Fahrzeuge) elektrische Energiespeicher und Pumpspeicherkraftwerke zur Verfügung. Zusätzlich werden Wasserstoffspeicher, Methanspeicher und thermische Warmwasserspeicher in verschiedenen Größenordnungen berücksichtigt. Die energetische Sanierung des Gebäudebestands wird ebenfalls modellendogen optimiert und ist durch zwei unterschiedliche Sanierungsstandards abgebildet.

Abbildung 11 zeigt den schematischen Aufbau des abgebildeten Energiesystems. Die Energienachfrageseite (rechts) wird dabei in vier Nutzungsbereiche unterteilt: Verkehr, Strom, Niedertemperatur- und Prozesswärme. In den Rechnungen wird das sogenannte „Ein-Knoten-Modell“ oder „Kupferplatten-Modell“ angenommen, in dem die Verteilung von Strom keinen Restriktionen unterliegt, das heißt, dass jede erzeugte und jede nachgefragte Einheit Strom im betrachteten Zeitschritt in ganz Deutschland verfügbar ist. Die notwendigen Kosten für Ausbau bzw. Betrieb des Stromnetzes sind in der Kostenrechnung enthalten.

Untersuchungsschwerpunkte:

- Kostenoptimierte strukturelle Entwicklungen treibhausgasneutraler nationaler Energiesysteme
- Zukünftige jahresscharfe Ausbaupfade von Technologien sowie Marktanteil- und Technologietrends
- Technologiespezifische Betriebsführungsstrategien basierend auf der Interaktion sektorkopplender Technologien
- Einfluss und Sinnhaftigkeit von Sektorkopplungstechnologien wie z.B. Elektrofahrzeuge, Elektrolyseuren oder elektrische Wärmepumpen im Gesamtsystemkontext

Hintergrund und Modellanwendung

Um die gesetzten Klimaschutzziele zu erreichen, hat die Bundesregierung die fundamentale Umgestaltung des Energiesystems beschlossen. Eine grundlegende Restrukturierung des heutigen Energiesystems ist somit unausweichlich. Wie und mit welchen Auswirkungen diese Umstrukturierung erfolgt, ist Gegenstand der Analysen mit dem Energiesystemmodell REMod:

Wie kann eine kostenoptimale Transformation eines nationalen Energiesystems - unter Berücksichtigung aller Energieträger und Verbrauchersektoren - im Einklang mit den erklärten Klimazielen und der Gewährleistung einer sicheren Energieversorgung erreicht werden? Aufgrund der individuell anpassbaren Durchführung von Szenario-basierten Simulationen, ist das Modell REMod zur Beantwortung spezifischer Fragen zur Transformation nationaler Energiesysteme bestens geeignet. In wiederholter Zusammenarbeit mit Bundes- und Landesministerien, internationalen Forschungseinrichtungen und vor allem durch den engen Austausch mit Industriekunden wurde die Anwendbarkeit als strategisches Beratungs-Tool bewiesen und das Modell fortlaufend weiterentwickelt.

Modelleigenschaften:

Die Grundfunktionalität des Modells REMod beruht auf einer kostenbasierten (nicht-linearen) Optimierung nationaler Energieversorgungssysteme, deren energiebedingte CO₂-Emissionen einen vorgegebenen Zielwert und/oder Zielpfad nicht überschreiten. Das Optimierungsziel besteht darin, alle Generatoren, Speicher, Konverter und Verbraucher zu minimalen Kosten so zu dimensionieren, dass die Energiebilanz des Gesamtsystems zu jeder Stunde erfüllt wird. Jede Technologieeigenschaft kann hierbei in beliebiger Detailtiefe abgebildet werden. So können z.B. verschiedene Ladestrategien für batterie-elektrische Fahrzeuge oder die Interaktion von thermischen Speichern und unterschiedlichster Heizungssysteme realitätsnah abgebildet werden. Im Model wird somit neben der ökologischen Nachhaltigkeit und Wirtschaftlichkeit auch die

Versorgungssicherheit durch eine hohe technische Detailtiefe sowie zeitliche Auflösung, die Energiebedarf und -nachfrage zu jeder Stunde über das gesamte Jahr hinweg in Einklang bringt, berücksichtigt. Ebenso können durch einen Mehr-Knoten-Ansatz unterschiedliche Regionen in dem Betrachtungsraum abgebildet und deren Interaktion untereinander untersucht werden, wodurch Rückschlüsse auf Infrastrukturmaßnahmen möglich sind.

Merkmale des Modells:

- Technischer Fokus: Beschreibung des Zusammenspiels der Energiesektoren Strom, Wärme, Mobilität und Industrie auf dem Transformationspfad bis 2045
- Ziel: Ermittlung der kostenoptimalen Umgestaltung des deutschen Energiesystems bis 2045 und Erreichung der festgelegten Reduktion von Treibhausgasemissionen.
- Typ des Energiesystemmodells: Technisches, Bottom-up Energiesystemmodell mit dynamischer, nicht-linearer Optimierung der Erweiterungsplanung
- Geographische Abdeckung: national (z.B. Deutschland) und regional möglich (z.B. Bundesländer)
- Zeitliche Auflösung: stündliche von 2020 (Kalibrierung) bis 2050
- Alle Sektoren: Nachfrage, Erzeugung, Speicherung, Energieumwandlung, Nachfragesteuerung sowie Infrastrukturen
- Rahmenbedingungen: Einhaltung einer festgelegten Reduktion von Treibhausgasemissionen (Budget und/oder jahresscharf)
- Umgang mit Unsicherheit: Sensitivitätsanalysen z.B. verschiedene Szenarioberechnungen
- Programmiersprache: Julia / Python, Solver: Covariance Matrix Adaptation Evolution Strategy (CMA-ES)

Abbildung 10 zeigt den schematischen Aufbau des abgebildeten Energiesystems. Die Energienachfrageseite (rechts) wird dabei in vier Nutzungsbereiche unterteilt: Verkehr, Strom, Niedertemperatur- und Prozesswärme. In den Rechnungen wird das sogenannte „Ein-Knoten-Modell“ oder „Kupferplatten-Modell“ angenommen, in dem die Verteilung von Strom keinen Restriktionen unterliegt, das heißt, dass jede erzeugte und jede nachgefragte Einheit Strom im betrachteten Zeitschritt in ganz Deutschland verfügbar ist. Die notwendigen Kosten für Ausbau bzw. Betrieb des Stromnetzes sind in der Kostenrechnung enthalten.

Eine ausführliche Liste der Referenzen ist [hier](#) zu finden.

Abbildung 10: Schematische Darstellung des in REMod-D abgebildeten Energiesystems ohne die Darstellung der Subsysteme für Wärmeversorgung von Gebäuden und Verkehr (Quelle: Fraunhofer ISE)



A.1.7 Modellbeschreibung TIMES

Das Energiesystemmodell TIMES (The Integrated Market Eform System) ist eine in GAMS geschriebene Weiterentwicklung der beiden Modellgeneratoren MARKAL und EFOM-ENV. TIMES wurde in den letzten Jahren im Rahmen des „Energy Technology Systems Analysis Programme“ (ETSAP) der IEA unter Mitwirkung des IER entwickelt. Es ist somit in eine Klasse mit den Modellen MARKAL, EFOM oder MESSAGE einzuordnen. Der Modellgenerator TIMES wurde aus Gründen der Portierbarkeit in der allgemeinen Modellierungssprache GAMS entwickelt. TIMES ist ein mehrperiodisches, lineares Optimierungsmodell, das auf einem prozesstechnischen Ansatz basiert, bei dem einzelne Anlagen im Energiesystem aggregiert abgebildet werden.

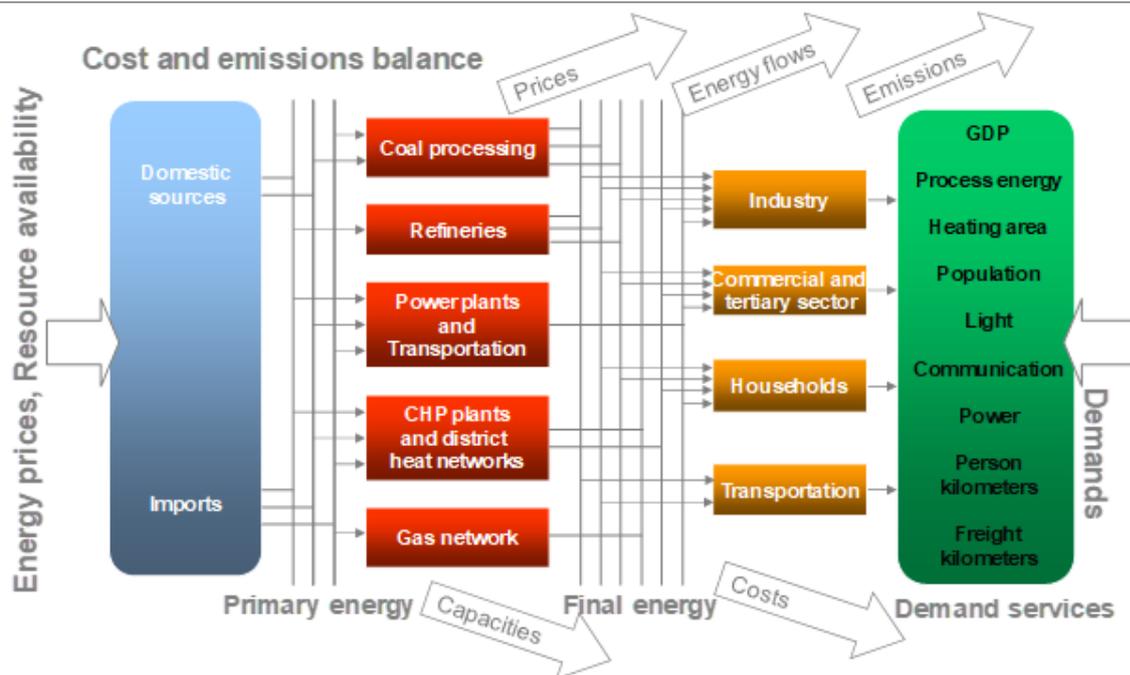
Ziel ist die Ermittlung der wirtschaftlich optimalen Struktur des Energiesystems bei einem vorzugebenden Nutzenergie- bzw. Energiedienstleistungsbedarf und ggf. energie- und umweltpolitischen Vorgaben. Hierzu erfolgt eine Minimierung der diskontierten Aufwendungen des Energiesystems, wobei jedoch die einzelnen Akteure (Haushalte, Industrie, Energieversorgung) unterschiedliche wirtschaftliche Kalküle haben können. Vorrangige Zielsetzung der Modellentwicklung von TIMES ist die flexible Struktur, um eine einfache Anpassung der mathematischen Modellformulierung an die jeweilige Problemstellung zu gewährleisten.

TIMES-D ist ein Energiesystemmodell für Deutschland, in dem das deutsche Energiesystem mit seinen Strukturen und Wechselwirkungen detailliert abgebildet wird. Das Modell TIMES-D wurde ursprünglich im Rahmen der Dissertation von Remme 2006 entwickelt und wurde seitdem kontinuierlich am IER weiterentwickelt (zum Beispiel von Fais 2015, Haasz 2017) und für zahlreiche, vor allem nationale Projekte eingesetzt, unter anderem für die Energieprognose 2009 im Auftrag des BMWi. Modelliert sind die Energieflüsse von der Primärenergiebereitstellung bis zur Energiedienstleistung. Insgesamt sind knapp 2.700 Prozesstypen erfasst.

TIMES-D umfasst den Modellhorizont von 2015 bis 2050 und bildet sowohl Energieflüsse als auch (energie- und prozessbedingte) Treibhausgas- und Schadstoffemissionen ab. Zur Erfassung der zeitlichen Struktur der Energienachfrage und des Angebotes, insbesondere bei den erneuerbaren Energien, ist das Modell pro Meilensteinjahr in 672 Zeitsegmente untergliedert. Innerhalb des Modells sind alle Angebots- und Nachfragesektoren des Energiesystems erfasst. Dazu zählen die Ressourcenbereitstellung, die öffentliche Strom- und Wärmeversorgung sowie die Nachfragesektoren Industrie, Haushalte, Verkehr, Gewerbe, Handel, Dienstleistungen (GHD) und Landwirtschaft. Zwischen den einzelnen Sektoren bzw. zwischen den verschiedenen Technologien und Energieumwandlungspfaden ist ein vollständiger Wettbewerb unterstellt. Diese Sektoren sind detailliert und technologieorientiert mit den jeweiligen sektorspezifischen Besonderheiten abgebildet. Dazu zählen unter anderem Sterbekurven des Kraftwerksparks oder Potenziale für erneuerbare Energien sowie Einsparpotenziale im Gebäudebestand. Als nationales Modell für Deutschland wird TIMES-D bezüglich der Importe und Exporte von Energieträgern über Import- und Exportpreisannahmen geschlossen, die teilweise in Potenzialstufen weiter untergliedert sind.

Als optimierendes Energiesystemmodell können mit TIMES-D sehr einfach Szenarien mit Begrenzungen simuliert werden, seien es Obergrenzen für das Niveau des Primärenergieverbrauchs oder für die Treibhausgasemissionen oder Mindestanteile am Primär-, am Bruttoendenergie- oder am Endenergieverbrauch, zum Beispiel der erneuerbaren Energien. Somit kann mit einem Modelllauf analysiert werden, welche Strukturen sich im Energiesystem einstellen würden, um die Begrenzungen einhalten zu können, wobei die Wechselwirkungen im Energiesystem, zum Beispiel zwischen Stromnachfrage und -angebot, integriert berücksichtigt werden.

Abbildung 11: Optimierendes Energiesystemmodell TIMES-D



Referenzen:

Remme, U. (2006): Zukünftige Rolle erneuerbarer Energien in Deutschland: Sensitivitätsanalysen mit einem linearen Optimierungsmodell, IER Forschungsberichte, Band 99.

Fais, B. (2015): Modelling policy instruments in energy system models – the example of renewable electricity generation in Germany, IER Forschungsberichte, Band 121.

Haasz, T. (2017): Entwicklung von Methoden zur Abbildung von Demand Side Management in einem optimierendem Energiesystemmodell – Fallbeispiele für Deutschland in den Sektoren Industrie, Gewerbe, Handel, Dienstleistungen und Haushalte, IER Forschungsberichte, Band 131.

A.1.4 Meilenstein-Dokument 5: Dokument zum empirischen Input in Akteursmodelle und techno-ökonomische Modelle inkl. Diskussion der technologie-generischen Übertragbarkeit der Erhebungsmethoden

Manifold

Empirie und Modellschnittstellen: Ergebnisse

Ergebnisse aus den empirischen Untersuchungen als Input für Modelle sowie Schnittstellen zwischen Akteurs-, Diffusions-, Energiesystem- und Strommarktmodellen.

Anhang A.1.4: Bericht zum Meilenstein 5

Ort: Karlsruhe

Datum: Dezember 2023

Diese Arbeit wurde durch das BMWK gefördert.

© Fraunhofer ISI, IQIB GmbH, IER Universität Stuttgart, ZIRIUS Universität Stuttgart, IREES GmbH, Fraunhofer ISE, FCN RWTH Aachen University, IPMB TU Braunschweig (2023) Manifold. Ergebnisse aus den empirischen Untersuchungen als Input für Modelle sowie Schnittstellen zwischen Akteurs-, Diffusions-, Energiesystem-, und Strommarktmodellen. Bericht zum Meilenstein 5. Karlsruhe.

Impressum

MANIFOLD

Empirie und Modellschnittstellen: Ergebnisse

Autorinnen und Autoren

Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung ISI, Karlsruhe

Heike Brugger, heike.brugger@isi.fraunhofer.de; Alexandra Pröpfer, alexandra.pröpfer@isi.fraunhofer.de; Christoph Kleinschmitt, christoph.kleinschmitt@isi.fraunhofer.de

Institut für qualifizierende Innovationsforschung und -beratung (IQIB), Bad Neuenahr-Ahrweiler

Bert Droste-Franke, bert.droste-franke@iqib.de; Markus Voge, markus.voge@iqib.de

Institut für Energiewirtschaft und Rationelle Energieanwendung (IER), Universität Stuttgart

Audrey Dobbins, audrey.dobbins@ier.uni-stuttgart.de; Kerstin Haller, kerstin.haller@ier.uni-stuttgart.de; Ulrich Fahl, ulrich.fahl@ier.uni-stuttgart.de;

Zentrum für interdisziplinäre Risiko- und Innovationsforschung (ZIRIUS), Universität Stuttgart

Sandra Wassermann, sandra.wassermann@zirius.uni-stuttgart.de; Wolfgang Hauser, wolfgang.hauser@zirius.uni-stuttgart.de

Institut für Ressourceneffizienz und Energiestrategien (IREES), Karlsruhe

Jan Steinbach, j.steinbach@irees.de

Fraunhofer Institut für Solare Energiesysteme (ISE), Freiburg

Charlotte Senkpiel, charlotte.senkpiel@ise.fraunhofer.de

Institute for Future Energy Consumer Needs and Behavior (FCN), RWTH Aachen University

Christina Kockel, christina.kockel@eonerc.rwth-aachen.de; Jakob Kulawik, jakob.kulawik@eonerc.rwth-aachen.de

Technische Universität Braunschweig, Institut für Psychologie, Abteilung für Psychologische Methodenlehre und Biopsychologie (IPMB)

Farina Wille, farina.wille@tu-braunschweig.de

Fördermittelgeber

Projekträger Jülich für das Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK)

Veröffentlicht

Dezember 2023

Hinweise

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 Auftraggebers wider.

Inhaltsverzeichnis

_Toc154235306

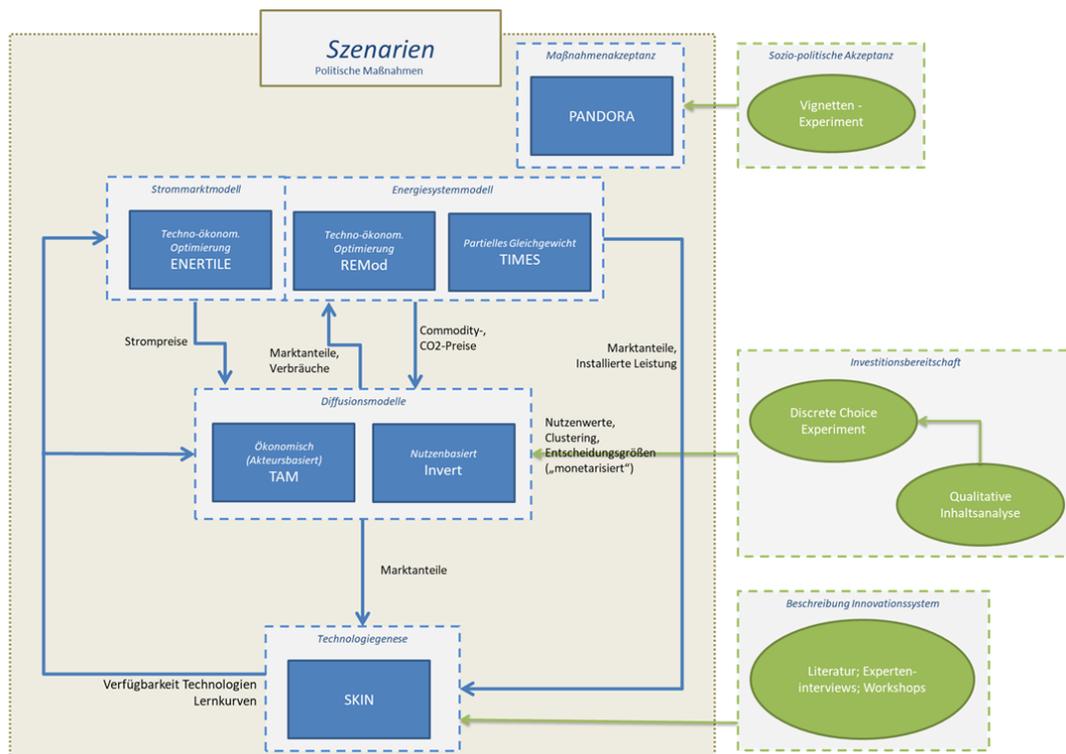
1	Einleitung	5
2	Empirie: Ergebnisse und Integration in die Modelle	7
2.1	Empirische Arbeiten zur Verbesserung der Technologiegenese-Modellierung	7
2.1.0	Expert*inneninterviews, Workshops.....	7
2.1.1	Ergebnisse aus den empirischen Erhebungen	8
2.1.2	Empirie als Input für das Technologiegenese-Modell.....	12
2.2	Ermittlung der Investitionsbereitschaft.....	14
2.2.1	Attributsauswahl für DCE und Pilotstudie.....	14
2.2.2	Schnittstelleneinbettung der Qualitative Interviews potentieller Adopter*innen und Fragestellung	19
2.2.3	Durchführung, Auswertung und Ergebnisse der qualitativen Interviews potentieller Adopter*innen	19
2.2.4	Integration der Qualitativen Interviews und des DCE.....	40
2.2.5	Durchführung, Auswertung und Ergebnisse der empirischen Erhebung des DCE.....	43
2.2.6	DCE-Ergebnisse als Input für TAM/INVERT	52
2.3	Empirie als Input für das Akteursmodell PANDORA.....	53
2.3.0	Grundlagen des Vignetten-Experiments	53
2.3.1	Ergebnisse des Vignetten-Experiments	54
2.3.2	Einbindung der Ergebnisse in PANDORA	63
3	Abbildungsverzeichnis.....	66
4	Tabellenverzeichnis	68
5	Literaturverzeichnis	69
A.1	Annex – Modellbeschreibungen	73
A.1.1	Modellbeschreibung PANDORA.....	73
A.1.2	Modellbeschreibung SKIN	75
A.1.3	Modellbeschreibung INVERT	76
A.1.4	Modellbeschreibung TAM.....	80
A.1.5	Modellbeschreibung ENERTILE.....	82
A.1.6	Modellbeschreibung REMOD.....	83
A.1.7	Modellbeschreibung TIMES.....	85
A.2	Annex	88
A.2.1	Interviewleitfaden der qualitativen Interviews potentieller Adopter*innen	88
A.2.2	Transkriptionsleitfaden.....	102
A.2.3	Überarbeitetes Kodiersystem nach zehn Prozent Materialdurchgang.....	103

A.2.4	Konzeptkarten der Prozessschritte, Verhaltenssequenzen und deren zeitlicher Dauer	111
A.2.4.1	Fall 2.....	111
A.2.4.2	Fall 3.....	112
A.2.4.3	Fall 5.....	113
A.2.4.4	Fall 6.....	114
A.2.4.5	Fall 10.....	115
A.2.4.6	Fall 11.....	116
A.2.4.7	Fall 12.....	117
A.2.4.8	Fall 13.....	118

1 Einleitung

Der Manifold-Bericht zum Meilenstein 5 dokumentiert die Ergebnisse der im Rahmen von Manifold durchgeführten empirischen Studien und konkretisiert auf welche Weise diese als Input für die Akteurs-Modelle dienen. Die jeweiligen Schnittstellen zwischen Empirie und der Modellintegration wird in Abbildung 1 dargestellt.

Abbildung 1: Empirie- und Modellschnittstellen und Modellintegration



Die direkte Integration der empirischen Ergebnisse erfolgt über die Akteurs-Modelle SKIN (SLICK), TAM/Invert und PANDORA. Der Bericht gliedert sich entsprechend der Schnittstellen indem zunächst die empirischen Ergebnisse dargelegt und anschließend deren Integration in die Modelle beschrieben werden

Der Fokus des Modells PANDORA ist die Abbildung gesellschaftspolitische Akzeptanz der Bürger*innen für politische Maßnahmen, die die Machbarkeit der Maßnahmen und deren Umsetzungswahrscheinlichkeit beeinflusst. Empirische Erkenntnisse über die gesellschaftspolitische Akzeptanz im Wärmesektor wurden über eine Online-Umfrage erhoben. Durch die Kombination dieser Eingaben in einer agentenbasierten Simulation kann die Durchführbarkeit von unterschiedlichen politischen Rahmenbedingungen analysiert und als Input für die Verknüpfung mit Makro- und Mikro-modellen genutzt werden.

Politische Rahmenbedingungen können gezielte Technologieforschung fördern, wie zum Beispiel das Energieforschungsprogramm der Bundesregierung oder der Strategieplan für Energietechnologie (SET) der Europäischen Union. Durch gezielte Forschung und Informationskampagnen werden bestimmte Technologien bei verschiedenen Akteuren beworben. Neben der Technologiegenese ist die Wissensdiffusion ein wichtiger Treiber für die tatsächliche Etablierung der Technologie auf dem

Markt. Dazu gehören Herstellende, aber auch Techniker*innen und das Handwerk, welche die Investitionsentscheidungen der Einzelnen beeinflussen. Für die Parametrisierung des Technologiegenesemodells SKIN, bzw. des im Rahmen des Projektes neu entwickelten Modells SLICK (“Simulating Learning Curves via Knowledge modeling”) wurden empirische Untersuchungen (Interviews, Workshops, Expert*innen, etc.) durchgeführt, um Prozesse und Akteure zu charakterisieren und das Modell an beobachteten Innovationsnetzwerkstrukturen, aber auch an möglichen zukünftigen Marktanteilen der Technologie zu kalibrieren. Auf Basis der Ergebnisse werden modellierte Prozesse gestaltet, die Modellauflösung gewählt und die Parametrisierung des Modells erarbeitet. Die qualitativen Ergebnisse werden dabei unterstützt durch quantitative Daten aus Statistiken zu Unternehmen und Branchen, Patenten, Forschungs- und Entwicklungsprogrammen. Aus ihnen werden Zahlen abgeleitet, die im Modell direkt verwendet werden können.

Die Marktakzeptanz bzw. Technologiediffusion kann auf Basis von mikroperspektivischen Energiesystemmodellen simuliert oder optimiert werden. Das Ergebnis des Mikroperspektivenmodells ist die Marktdurchdringung von Technologien wie Heizungsanlagen, Anteile von Heizungsanlagen und Sanierungsraten auf Basis des Investitionsverhaltens unter bestimmten Bedingungen. Discrete Choice-Experimente (DCE) sind ein nützliches Instrument zur empirischen Datenerhebung, da diese das Investitionsverhalten innerhalb eines Experiments abbilden und Nutzwerte ermitteln können. Ergänzt wurde das DCE durch qualitative Interviews. Die Ergebnisse der Inhaltsanalyse wurden in das Umfragedesign des DCE aufgenommen.

2 Empirie: Ergebnisse und Integration in die Modelle

2.1 Empirische Arbeiten zur Verbesserung der Technologiegenese-Modellierung

Die Prozesse zur Entstehung von Innovationen sind komplex und bestehen aus vielen Einzelschritten, die miteinander verwoben sind. Das zu betrachtende System besteht aus den Technologien (Hardware), aber auch aus Marktaspekten, Produktionsmitteln und -wissen sowie dem sozialen Kontext der Akteure. Um zum einen die relevanten Aspekte abdecken zu können und zum anderen die Innovationslandschaft möglichst gut abzubilden, stellen vor diesem Hintergrund Informationen von Akteur*innen im Feld zu den wichtigen Themen sowie zur Charakterisierung von Akteur*innen und ihrer Umwelt einen wesentlichen Input zur Modellierung von Innovationsnetzwerken im Technologiegenesemodell SKIN bzw. im darauf aufbauenden Modell SLICK dar. Die hierzu verwendeten Ansätze und Ergebnisse werden im Folgenden beschrieben.

Es wird darauf hingewiesen, dass das zur Verwendung vorgesehene Modell SKIN ("Simulating Knowledge dynamics in Innovation Networks") den Anforderungen des Projekts nicht genügte, sodass ein darauf aufbauendes, aber gänzlich neues Modell namens SLICK ("Simulating Learning Curves via Knowledge modeling") entwickelt wurde. Wissen wird im SLICK-Modell anders abgebildet, was die Integrierung von Lernkurven in die Modellierung ermöglichte. Viele Prozesse und Mechanismen konnten aber in ähnlicher Form aus SKIN übernommen werden.

2.1.0 Expert*inneninterviews, Workshops

Die empirischen Analysen als Grundlage des Technologiegenese-Modells dienen im Sinne eines ersten Schrittes in einem Co-Design-Prozess der Identifizierung wichtiger Fragen aus der Praxis, die bei der Gestaltung des Modells berücksichtigt werden sollen. Sie folgen einem Mixed-Methods-Ansatz. Dabei werden quantitative und qualitative Methoden gemischt, um eine realitätsnahe Abbildung von Prozessen der Innovationsgenese zu ermöglichen. Wertvolle Informationen dazu werden aus qualitativen Erhebungen in Form von Expert*inneninterviews und Workshops gewonnen. Mit ihnen werden die wesentlichen Akteure und Funktionsmuster analysiert und die aktuelle Funktionserfüllung bzw. entsprechende Innovationshemmnisse identifiziert. Aus den Analysen können dann wichtige Fragen an das Modell abgeleitet werden. Zusätzlich werden Modellergebnisse im Hinblick auf ihre Realitätsnähe und daraus ableitbare Handlungsempfehlungen diskutiert. Die Grundlage für die qualitativen Analysen bildet die Theorie Technologischer Innovationssysteme. Um das gesamte Innovationssystem zu charakterisieren, werden die Analysen entlang der sieben typischen Funktionen Technologischer Innovationssysteme durchgeführt (Hekkert et al., 2007; Hekkert et al., 2011):

- 1) Unternehmerisches Experimentieren
- 2) Entstehung von Wissen
- 3) Diffusion von Wissen
- 4) Suchrichtung
- 5) Ressourcenmobilisierung
- 6) Marktformierung
- 7) Legitimität

Die Interviews und Workshops werden in mehreren aufeinander aufbauenden Schritten durchgeführt. Expert*inneninterviews werden zunächst dazu genutzt, einen ersten Überblick über das Innovationssystem und einen Einblick in die wichtigsten Akteure und Strukturen zu gewinnen und diesen zu vertiefen. Im ersten Workshop werden bereits identifizierte Hemmnisse entlang der sieben Funktionen Technologischer Innovationssysteme diskutiert, kommentiert, korrigiert und ergänzt. Das Ergebnis ist ein fundierter Überblick über das Innovationssystem und aktuelle Hemmnisse sowie erste mögliche Politikmaßnahmen, durch die sie beseitigt oder abgeschwächt werden können. Die Ergebnisse des Workshops stellen eine wesentliche Grundlage für die Gestaltung des Technologiegenese-Modells dar. Vorhandene Prozesse werden überprüft und wo notwendig ergänzt, um die wesentlichen Fragen bezüglich der Wirkung verschiedener Politikmaßnahmen beantworten zu können. Der Schwerpunkt der Modellierung liegt dabei auf Wissensgenerierung und -austausch. Nach Umsetzung des Modells und der Durchführung von Experimenten zur Beantwortung der Fragen werden die Modellergebnisse in einem weiteren Workshop im Hinblick auf ihre Aussagekraft und Realitätsnähe diskutiert. Gegebenenfalls werden noch weitere Änderungen im Modell vorgenommen bzw. weitere Experimente durchgeführt, um die Analysen zu verbessern.

2.1.1 Ergebnisse aus den empirischen Erhebungen

Für eine erste Orientierung wurde je ein Experte bzw. eine Expertin pro Technologie interviewt, der einen großen Überblick über das Innovationssystem der Technologie hat. Bei den projektinternen abgestimmten betrachteten Technologien handelt es sich um Wärmepumpen- und Brennstoffzellenheizgeräte, insbesondere für Einfamilienhäuser. Die gewonnenen Expert*innen stammen aus dem Bereich Bundesverbände, Energieagenturen und Verbraucherzentralen. Die Interviews folgten Leitfäden, die nach den sieben Funktionen des TIS F1 bis F7 (siehe voriger Abschnitt) strukturiert waren.

Aus dem Interview zu Wärmepumpen wurde eine Liste mit den relevantesten Herstellern von Wärmepumpenheizgeräten gewonnen, darüber hinaus weitere wichtige Akteure wie Bundesverbände und Dach- und Fachverbände in Deutschland, Österreich, der Schweiz und auf europäischer Ebene sowie Fachtagungen und Kongresse national und international. Es wurde auf die ebenfalls wichtigen Akteursgruppen Bohrunternehmen sowie energievorsorgende Unternehmen (EVUs) hingewiesen. EVUs sind einerseits wichtig für das Geschäftsmodell des Contracting und andererseits, weil sich über den Strompreis der Wärmepumpentarife der EVUs die Wirtschaftlichkeit einer Wärmepumpe entscheidet. Bohrunternehmen sind interessant, weil Bohrungen für Sole-Wasser-Wärmepumpen, die das Erdreich als Wärmequelle verwenden und daher eine Erdsonde benötigen, durch starke Regulation rechtlich kompliziert und auch teuer sind. Weitere wichtige Punkte aus dem Interview:

- Bezüglich Marktformierung (F6):
 - Strompreis wichtig für Wirtschaftlichkeit der Wärmepumpe.
 - CO₂-Preis wichtig, weil er den Strompreis und damit die Wirtschaftlichkeit beeinflusst.
 - Entwicklung von Wärmenetzen wichtig, die mit oder ohne Wärmepumpen betrieben werden können.
 - Hersteller haben keine finanziellen Probleme bei 20-30% Wachstum auf dem Wärmepumpenmarkt und viel Neubautätigkeit.
- Bezüglich Diffusion von Wissen (F3):
 - Problem, dass Wärmepumpen auf Grund hoher Vorlauftemperaturen in Bestandsgebäuden nicht in Frage kommen, ist technologisch gelöst, das Wissen darüber aber noch nicht weit verbreitet. Daher werden Wärmepumpen noch immer kaum in der Bestandssanierung, sondern hauptsächlich in Neubauten eingesetzt und bleiben in einer Nische. (An-

merkung: Durch den Angriffskrieg auf die Ukraine und die damit eingesetzte Gasknappheit und Energiekrise hat sich dies inzwischen etwas geändert. Das Interview wurde aber weit davor, im Jahr 2020, durchgeführt.)

- Großer Wissensrückstand bzgl. Wärmepumpen bei vielen Installateur*innen, da kein Druck da ist, sich weiterzubilden.
- Trennung der Gewerke: Heizung/Sanitär und Strom per Gesetz strikt getrennt, dadurch oft keine ganzheitliche Betrachtung.
- Installateur*innen, Planungs- und Ingenieur*innenbüros und Energieberatung spielen wichtige Rollen, der Wissensaustausch mit/zwischen ihnen ist aber oft schwierig.
- Bezüglich Suchrichtung (F4):
 - Grundannahme: "Wärmemarkt der nahen Zukunft wird sich aufteilen in Wärmenetze und Wärmepumpen, weil für H₂ die Infrastruktur fehlt."
- Bezüglich Entstehung von Wissen bzw. Forschung und Entwicklung (F2):
 - Fokus liegt auf Automatisierung der Produktion zur Kostensenkung.
 - Weiterer Fokus systemdienliche Integration von Wärmepumpen ins Stromnetz mit viel Austausch zwischen Industrie und Wissenschaft.

Aus dem Interview zu Brennstoffzellen wurden ebenfalls Listen mit relevanten Herstellern von Brennstoffzellenheizgeräten, Verbänden sowie Fachtagungen und Kongressen gewonnen. Außerdem gab es viel Feedback zu bereits recherchierten Akteuren, von denen viele ausgeklammert werden können, weil sie sich nur mit mobilen Anwendungen von Brennstoffzellen und nicht mit stationären Heizgeräten beschäftigen. Allgemein ist das Innovationsystem Brennstoffzelle stark von der Mobilität dominiert, Heizgeräte sind eher eine Randerscheinung. Weitere wichtige Punkte aus dem Interview:

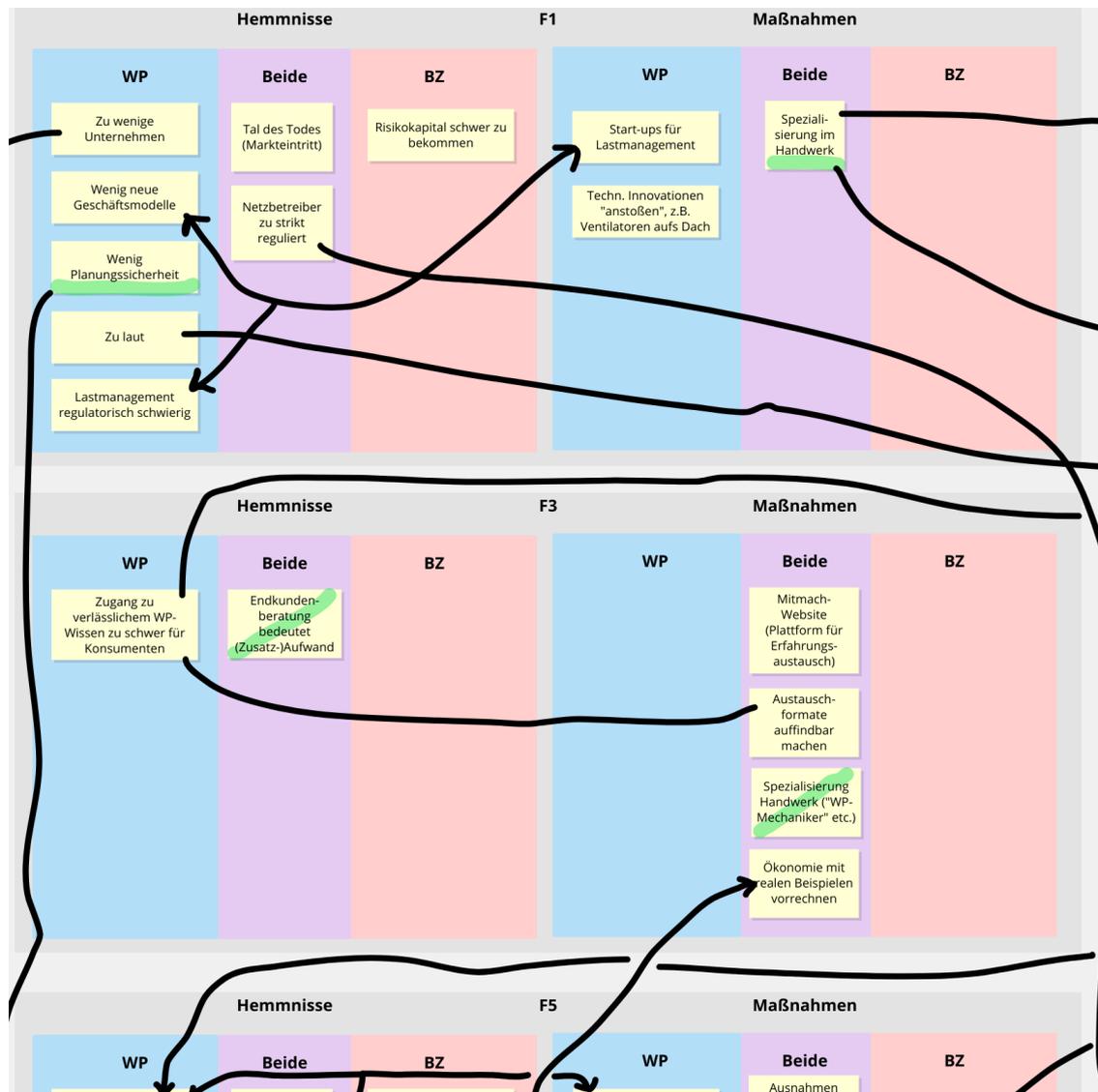
- Bezüglich Marktformierung (F6):
 - Trennung des Marktes in Groß- (60 kW) und Kleinanlagen (1-1,5 kW) mit wenig Wissensaustausch untereinander.
 - Gasleitungen müssen H₂-ready werden, Zielmarke 30% Beimischung H₂ im Gasnetz, heute 5-10% möglich.
 - Vorhandensein von Überschussstrom zur H₂-Produktion entscheidet über Verfügbarkeit und damit Wirtschaftlichkeit. Unsicher bei zunehmender Direktelektrifizierung des Straßenverkehrs.
 - CO₂-Bepreisung entscheidet mit über Wirtschaftlichkeit.
- Bezüglich Diffusion von Wissen (F3):
 - Wie bei Wärmepumpen kein Innovationsdruck seitens der Installateur*innen (volle Auftragsbücher).
 - Kontakt zwischen Wissenschaft und Wirtschaft ausreichend gut.
 - Wichtige Schnittstelle: NOW GmbH.
 - Es wird häufig nicht im System gedacht, z.B. Kombination von Brennstoffzelle mit Speicher.
- Bezüglich Entstehung von Wissen bzw. Forschung und Entwicklung (F2):
 - Aktuelle Schwerpunkte:
 - Langlebigkeit (momentan bei 7-12 Jahren)
 - Verbilligung
 - Industrialisierung/Automation der Produktion
 - noch sehr hoher Ausschuss

- noch viel Handarbeit, vor allem beim Erkennen von Ausschuss
- noch zu geringe Replizierbarkeit

Der erste Expert*innen-Workshop fand statt am 17.03.2021 als reine Online-Veranstaltung. In die Planung und inhaltliche Konzeption des Workshops sind bereits Erkenntnisse aus den Interviews eingeflossen. Die Teilnehmer*innen repräsentierten die Akteursgruppen Stadtwerke, Energieagenturen, Installateur*innen, Industrieverbände, Installateur*innenausbilder*innen sowie Wissenschaft und Forschung.

Nach einer kurzen Einführung ins Projekt und einer Vorstellungsrunde mit der Möglichkeit für die Teilnehmer*innen, ihnen wichtige Punkte zu Hemmnissen und Maßnahmen des Innovationssystems zu nennen, gab es einen interaktiven Teil, in dem die Teilnehmenden online ein sogenanntes Conceptboard, eine Art riesige digitale Leinwand, füllen und mit Anmerkungen versehen konnten. Das Board war bereits eingeteilt in die sieben Funktionen F1 bis F7 der Analyse Technologischer Innovationssysteme (TIS), siehe voriger Abschnitt, sodass strukturiert vorgegangen wurde und keine wichtigen Bereiche übersehen wurden. Nach einer Zeit der Einzelarbeit wurden die Ergebnisse zusammengetragen und gemeinsam diskutiert.

Abbildung 2: Ausschnitt aus dem bereinigten Conceptboard mit den Ergebnissen des Expert*innen-Workshops



Die Inhalte des Boards wurden anschließend bereinigt und Doppelnennungen zusammengefasst. Ein Ausschnitt aus dem überarbeiteten und gekürzten Conceptboard ist in Abbildung 2 zu sehen. Außerdem wurden die Aussagen für die leichtere Anwendbarkeit auf die Innovationssystemmodellierung nach den sie betreffenden Akteursgruppen sortiert. Die wichtigsten Aussagen sind hier knapp zusammengefasst:

- Industrie/Wirtschaft:
 - Fehlende Geschäftsmodelle/Firmen/Start-ups
 - Installation von Geräten kompliziert
 - Geringe Investitionssicherheit
 - Strompreis zu hoch
- Industrieverbände:
 - Gesetzgebung EU und national zu langsam
 - Verbandsarbeit abstimmen in Richtung Normen und Gesetze
- Netzbetreiber:

- Regulierung verhindert Innovationen
- Stromnetzertüchtigung notwendig aber schwierig
- Geringe Unterstützung für Contractoren
- Umständliche Formalitäten (z.B. Anmeldung von Anlagen)
- Forschung/Wissen:
 - Aufklärung von falschen Aussagen/veraltetem Wissen durch Wissenschaftskommunikation
 - Luft-Wärmepumpen teils zu laut: Innovationspotenzial
 - Zugang zu Materialien/Ressourcen für Forschung teils schwierig
 - Technische Innovationen für Start-ups: KI-optimierte Wärmepumpen, Horizontalventilatoren, Ventilatoren auf Dach, gedämmte Kompaktanlagen
- Handwerk:
 - Fachkräftemangel: Fachkräfteoffensive, insbesondere bei Frauen
 - Zu wenige Firmen mit Fachkenntnis
 - Keine Anreize zur Weiterbildung/zum Einbau innovativer Technologien
 - Vorurteile/veraltetes Wissen: Weiterbildung anreizen/verpflichten
 - Hohe Anforderungen: Spezialisierung nötig
 - Betriebe zu klein und nicht auf Wachstum ausgelegt
 - Ausbildungsstruktur problematisch: Innovative Technologien vor Markteintritt in Lehrplan, klimaverträgliche Technologien ins Zentrum
- Verbraucher*innen/Eigentümer*innen:
 - Fehlendes Wissen/veraltetes Wissen
 - Keine verlässlichen Wissensquellen
 - Komplizierte/verwirrende Zusammenhänge
 - Zeitdruck bei Heizungsausfall/Investitionsentscheidung
 - Wärmepumpe als störend empfunden (laut, groß)
 - Kompliziertes Mietrecht
 - Förderung komplex
 - Banken unkooperativ
- Medien/Gesellschaft:
 - Wasserstoff-Hype verunsichert/weckt falsche Vorstellungen (Investitionen werden verschleppt)
 - Fundierte Aufklärung benötigt
 - Notwendigkeit konsequenten Umstiegs auf EE nicht ausreichend kommuniziert
- Politik:
 - Keine klare Strategie/Festlegung zur "Wärmewende" bzgl. Rolle EE/fossiler Brennstoffe
 - Geringe Planungssicherheit (u.a. fehlende kommunale Wärmeplanung)
 - Zu viel Bürokratie
 - Ausbildungspläne anpassen

2.1.2 Empirie als Input für das Technologiegenese-Modell

Die in den Interviews und den Workshops erhaltenen Erkenntnisse gehen im Rahmen des oben beschriebenen iterativen Prozesses in die Modellentwicklung ein. Auf Basis ihrer Grundlagen werden modellierte Prozesse gestaltet, die Modellauflösung gewählt und die Parametrisierung des Modells erarbeitet. Die qualitativen Ergebnisse werden dabei unterstützt durch quantitative Daten aus

Statistiken zu Unternehmen und Branchen, Patenten, Forschungs- und Entwicklungsprogrammen. Aus ihnen werden Zahlen erarbeitet, die im Modell direkt verwendet werden können.

In dem im Projekt umgesetzten Modell soll die sukzessive Wissens- und Produktentwicklung aus bereits vorhandenem Wissen besser als bisher abgedeckt werden, um die technologische Entwicklung fundierter darstellen zu können. Insbesondere soll das in den qualitativen Erhebungen angesprochene Innovationspotenzial seitens der Forschung und Entwicklung bei Instituten und Herstellern besser abgebildet werden. Zentrales Entwicklungsziel des Modells war die Umsetzung eines Lernmechanismus, sodass die Produktionskosten durch die Entstehung und den Austausch von Wissen im Sinne von Lernkurven sinken. Dafür wurde, wie bereits erwähnt, das SKIN-Modell durch das gänzlich neu entwickelte Modell SLICK ersetzt.

Zudem ergibt sich aus den empirischen Analysen im betrachteten Bereich der Wärmetechnologien eine spezielle Rolle von Installateur*innen und damit ein großer Einfluss ihres Wissens auf die Vermarktung der Technologien. Aus diesem Grunde wurde eigens ein neues Modul entwickelt, das die Installateur*innen im Modell abbildet. Im Zentrum steht dabei das Wissensportfolio der Installateur*innen bzw. das Portfolio der durch sie installierbaren Technologien und dessen Beeinflussung v.a. durch Aus- und Weiterbildung.

Weitere Anknüpfungspunkte an die Empirie gibt es bei der Modellierung der Unternehmensaktivität und insbesondere der Start-up-Gründung. Start-ups spielen eine wichtige Rolle im Modell und entstehen und vergehen in einem dynamischen Prozess. Es gibt modellseitig verschiedene Wege zur Start-up-Gründung, durch zufällig neu entstehendes Wissen sowie durch die Anwendung bisher ungenutzten Wissens aus Wirtschaft und Wissenschaft.

Im Projekt stehen vor allem die Schnittstellen zu anderen Energiemodellen im Fokus. Deswegen wird das Modell auch ganz wesentlich durch bereits in anderen Modellen als zentral erkannte Parameter geleitet. Die modellierten Ergebnisse zu Lernkurven und Installateur*innen-Portfolien sollen dazu genutzt werden, die Modellierung entsprechender Investitionsentscheidungen in anderen Modellen zu ergänzen.

2.2 Ermittlung der Investitionsbereitschaft

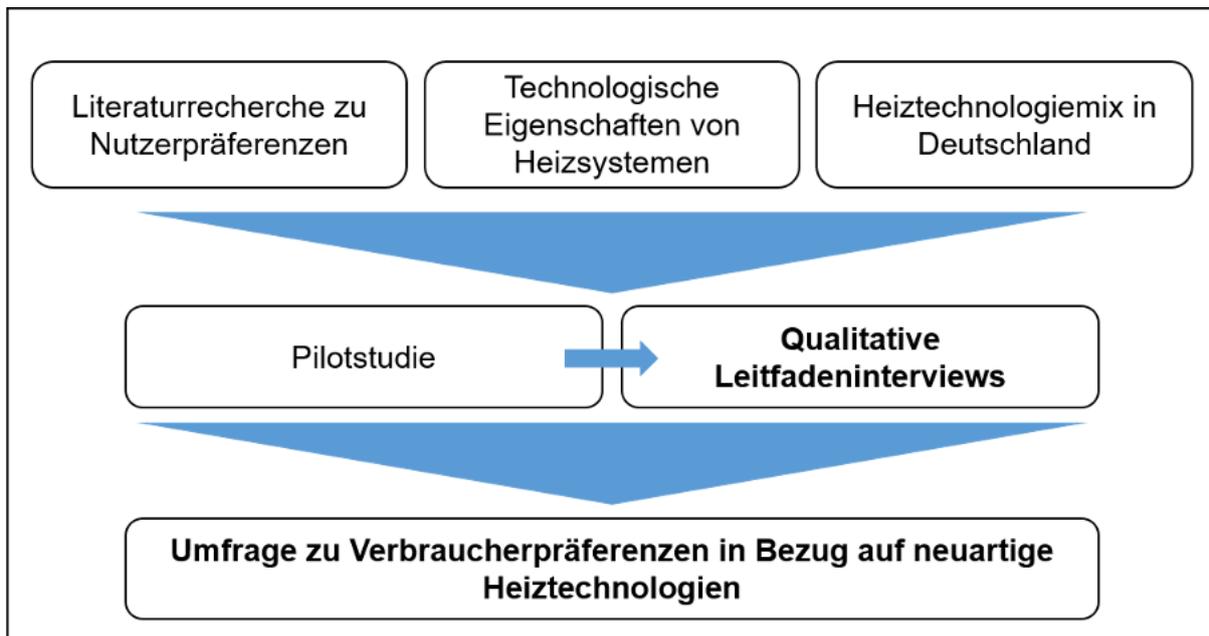
Im folgenden Kapitel wird auf die empirische Erhebung von Zahlungsbereitschaften und deren Integration in die Energiesysteme eingegangen. Dafür werden zunächst für die quantitative Erhebung mittels eines Discrete Choice Experiments (DCE) die Attributsauswahl sowie eine erste Pilotstudie in Abschnitt 2.2.1 und die Schnittstelleneinbettung der qualitativen Interviews Abschnitt 2.2.2 dargestellt. Darauf aufbauend werden in Abschnitt 2.2.3 die Durchführung, Auswertung und Ergebnisse der qualitativen Interviews erörtert und in 2.2.4 erläutert wie die Ergebnisse der Inhaltsanalyse in das Umfragedesign des DCEs aufgenommen werden. Die Ergebnisse der empirischen Erhebung werden im Kapitel 2.2.5 dargestellt. Wie diese finalen Ergebnisse in die Diffusionsmodelle Invert/ee-Lab und TAM integriert werden, legt Abschnitt 2.2.6 dar.

2.2.1 Attributsauswahl für DCE und Pilotstudie

Für die Ermittlung der Zahlungsbereitschaften von Haushalten für neuartige Heiztechnologien wurde ein DCE durchgeführt. Im Rahmen einer online durchgeführten Umfrage wurden Teilnehmende dabei mit mehreren Entscheidungssituationen konfrontiert und dabei die erklärten Präferenzen (engl. stated preferences) erfasst. Grundsätzlich wurde das methodische Vorgehen bei der Durchführung eines DCE bereits im Meilenstein 4 Dokument beschrieben. Im Folgenden wird daher nun auf das im Projekt MANIFOLD spezifische Vorgehen zur Auswahl der einzelnen Attribute eingegangen werden.

Eine Schwäche der Ermittlung von Präferenzen mithilfe eines DCE ist es, dass die Auswahl der Attribute der einzelnen Wahlalternativen einen starken Einfluss auf die letztendlich ermittelten Präferenzen hat. Dies hängt von drei Eigenschaften des DCE ab: (1) Die Zahl der Attribute, die im Rahmen eines DCE berücksichtigt werden können, ist theoretisch sehr groß, aufgrund unterschiedlicher Limitationen in der praktischen Durchführung jedoch stark begrenzt. (2) Attribute, die in der Realität möglicherweise eine Rolle für die Entscheidungsfindung spielen, aber nicht im DCE berücksichtigt werden, finden keinen Eingang in die ermittelten Nutzerpräferenzen. (3) Ermittelte Nutzerpräferenzen als Ergebnis des DCE setzen sich stets aus einer Gewichtung der einzelnen Attribute zusammen. Auch hier kann die Nichtberücksichtigung von relevanten Attributen die Ergebnisse verzerren.

Um der großen Relevanz der einzelnen Attribute im DCE Rechnung zu tragen, wurden diese in einem mehrstufigen Prozess ausgewählt (siehe Abbildung 3). In einem ersten Schritt wurde dabei eine Literaturrecherche durchgeführt, um Attribute von Heiztechnologien zu identifizieren, die sich bereits in früheren Untersuchungen als besonders relevant herausgestellt hatten. Auch die Heiztechnologien selbst, sowie der in Deutschland existierende Technologiemarkt wurden in diesem Rahmen untersucht.

Abbildung 3: Prozessschaubild - Ermittlung der Investitionsbereitschaft

Analyse früherer Studien zu Präferenzen für Heiztechnologien zeigte, dass einige klassische und für die Entscheidung intuitiv sehr relevante Attribute von Heizsystemen fast immer in den Untersuchungsrahmen aufgenommen wurden. Darunter fallen vor allem die Investitionskosten, sowie die laufenden variablen Kosten. Bei Letzteren wurden dabei teilweise nur die Betriebskosten, in anderen Fällen auch Wartungskosten berücksichtigt. Fragen des Betriebsaufwandes und der Bedienbarkeit, welche insgesamt den Komfort eines jeweiligen Systems abbilden, waren ebenfalls häufig untersuchte Attribute (Claudy et al., 2011). Je nach Schwerpunkt der Untersuchung gibt es weitere Attribute, wie beispielsweise der Autarkiegrad oder politische Förderprogramme (Michelsen & Madlener, 2012, 2013). Auch der Einfluss von Empfehlungen durch Freunde, Bekannte oder eine Energieberatung, sowie die Klimafreundlichkeit eines Heizsystems wurden untersucht (Achtnicht, 2010; Scarpa & Willis, 2010).

Im Herbst 2020 wurde auf Grundlage der ausgewählten Attribute bereits eine erste Pilotstudie durchgeführt. Wie die finale Umfrage, bestand auch diese Studie bereits aus drei Teilen. Der erste Teil beinhaltete einen kurzen Fragebogen zum soziodemographischen Hintergrund der Teilnehmenden sowie zur aktuellen Wohnsituation und verwendeten Heiztechnologie. Im Rahmen dieses Fragebogens wurde auch sichergestellt, dass die 1236 Teilnehmenden der Umfrage hinsichtlich der Faktoren Geschlecht, Alter und regionaler Verteilung repräsentativ zur deutschen Gesamtbevölkerung waren. Hinsichtlich der Faktoren Mieter und Eigentümer wurde außerdem sichergestellt, dass die Teilnehmenden ein Verhältnis von 50:50 aufwiesen. Den zweiten Teil der Umfrage bildete das eigentliche DCE. Dieses bestand aus jeweils acht Entscheidungssituationen, in welchen die Teilnehmenden vor die Wahlmöglichkeit aus zwei unterschiedlichen Heiztechnologien mit den folgenden Attributen gestellt wurden:

- Investitionskosten
- Jährliche Betriebskosten
- CO₂-Emissionsreduzierung
- Zeitaufwand der Informationssuche
- Hauptinformationsquelle

Bei der Wahl der Ausprägungen insbesondere der Attribute Investitionskosten, jährliche Betriebskosten und CO₂-Emissionsreduzierung wurden Informationen zu dem aktuellen Heiztechnologiemix in Deutschland sowie die technologischen Eigenschaften von Heiztechnologien berücksichtigt.

Als dritten Teil beinhaltete die Pilotstudie eine Likert-Skalen-Befragung. Hierbei bewerteten die Teilnehmenden wie sehr eine Aussage aus ihrer Perspektive zutrifft, bzw. nicht zutrifft. Der Mehrwert dieser nachgelagerten Befragung besteht darin, dass zusätzliche Informationen abgefragt werden können, die zuvor nicht Bestandteil des DCE waren sowie Präferenzangaben validiert werden. Aus den zusätzlichen Informationen lassen sich einerseits die Beweggründe der Teilnehmenden für im Rahmen des DCE ausgedrückte Präferenzen besser nachvollziehen, andererseits können auf diesem Weg weitere, im DCE nicht berücksichtigte Attribute abgefragt werden.

Im Folgenden wird kurz auf die Ergebnisse der Pilotstudie, sowohl des DCE als auch der Likert-Skalen-Befragung, eingegangen und dargelegt, welche Schlussfolgerung daraus für die qualitative Befragung sowie die weitere Attributauswahl für die zweite quantitative Befragung gezogen wurden.

Für die Auswertung des DCE der Pilotstudie wurde ein Mixed-Logit-Modell verwendet. Dieses Modell wird auch für die finale Studie genutzt und daher in Absatz 2.2.5 näher beschrieben. Die Koeffizienten zeigen sich als signifikant mit einem Niveau von 1 %. Zur Basis der Investitionskosten sind mittels der Koeffizienten die Zahlungsbereitschaften ermittelt worden (siehe Tabelle 1). Im Mittel und über die gesamte Stichprobe hinweg zeigt sich, dass die Reduzierung der Betriebskosten um einen Euro eine Zahlungsbereitschaft von ca. 20 Euro bei den Investitionskosten hervorruft. Die Reduzierung von 1 % CO₂-Emissionen ist im Durchschnitt schon knapp 77 Euro an Mehrinvestitionskosten wert. Eine zusätzlich aufgebrachte Stunde bei der Informationssuche hingegen wird mit einer negativen Zahlungsbereitschaft – also einer Ersparnis – von etwas mehr als 135 Euro bemessen. Für die Berechnung der Zahlungsbereitschaften hinsichtlich unterschiedlicher Informationsquellen wurde die Abweichung zur „Quelle“ des Freundes berechnet. Wenn die Information von einem*einer Fachinstallateur*in oder einer Energieberatung stammt, erhöhen sich die Zahlungsbereitschaften für die Investition um ca. 4574 Euro bzw. ca. 3162 Euro. Die Zahlungsbereitschaft der Befragten steigt somit, wenn die Informationen von einem Fachexpert*innen statt von einem Freund kommen. Die Zahlungsbereitschaft steigt auch, wenn die Information insbesondere aus eigener Recherche kommen, diese liegt sogar mit knapp 3832 Euro über der für Energieberatung. Da die Informationsquelle ein relevantes Attribut bei der Präferenzbildung zu sein scheint, aber auf der Datengrundlage der Pilotstudie noch keine Aussagen darüber getroffen werden können, woher dieser Sprung in Zahlungsbereitschaft kommt, wurde dieser Punkt in der qualitativen Befragung berücksichtigt. Auch die anderen Attribute und deren Ergebnisse sind in das Design der Befragung eingeflossen.

Tabelle 1: Ergebnisse des Discrete Choice Experimentes der Pilotstudie für die gesamte Stich-probe

Attribut	β	p-Wert	Zahlungsbereitschaft	Interpretation
CO₂-Emissionsreduktion	0,013	0,0000	77	EUR Zahlungsbereitschaft für ein Prozent CO ₂ -Reduktion
Eigenrecherchen	0,638	0,0000	3838	EUR Zahlungsbereitschaft im Vergleich zu Hauptinformationsquelle „Freund“
Fachinstallateur*in	0,761	0,0000	4573	
Energieberatung	0,526	0,0000	3163	
Investitionskosten	-	0,166		
Betriebskosten	-	3,340	20	EUR Zahlungsbereitschaft für Senkung der jährlichen Betriebskosten um einen EUR
Zeitaufwand	-	0,023	136	EUR Zahlungsbereitschaft für Senkung der benötigten Zeit für die Informationssuche um eine Stunde

Die vollständigen Ergebnisse der Likert-Skalen-Befragung werden in Abbildung 4 und Abbildung 5 gezeigt. Aussagen zwischen „Trifft voll und ganz zu“ und „Trifft eher zu“ werden dabei abstuftend in grün und Aussagen zwischen „Trifft eher nicht zu“ und „Trifft überhaupt nicht zu“ abstuftend in Rot dargestellt. Es zeigt sich, dass eine knappe Mehrheit der Befragten zumindest eher zustimmt Heiztechnologien, die bereits ausgereift sind, zu bevorzugen. Deutlich weniger – aber noch mehr als 50% – bevorzugen Heizungstechnologien, die der aktuell bei ihnen verbauten Technologie ähnelt. Auch die Meinung der Fachinstallateur*innen ist für knapp 90% der Befragten bei der Wahl der Heizungstechnologie wichtig. Dieser Punkt wurde daher auch verstärkt in der qualitativen Befragung berücksichtigt. Auch die Zeit die in Suche einer geeigneten Heizungstechnologie investiert wird, wird in der qualitativen Befragung aufgenommen, da über 75% bereit sind viel Zeit zu investieren. Für lokale umweltfreundliche Projekte gibt es eine klare Befürwortung der Mehrheit mit knapp 80%. Etwas weniger Befragte, aber immer noch die Mehrheit (ca. 65%), würden für umweltfreundliche Technologien auch geringe Geräuschemissionen in Kauf nehmen.

Abbildung 4: Ergebnisse der Likert-Skalen-Befragung der Pilotstudie (Teil 1)

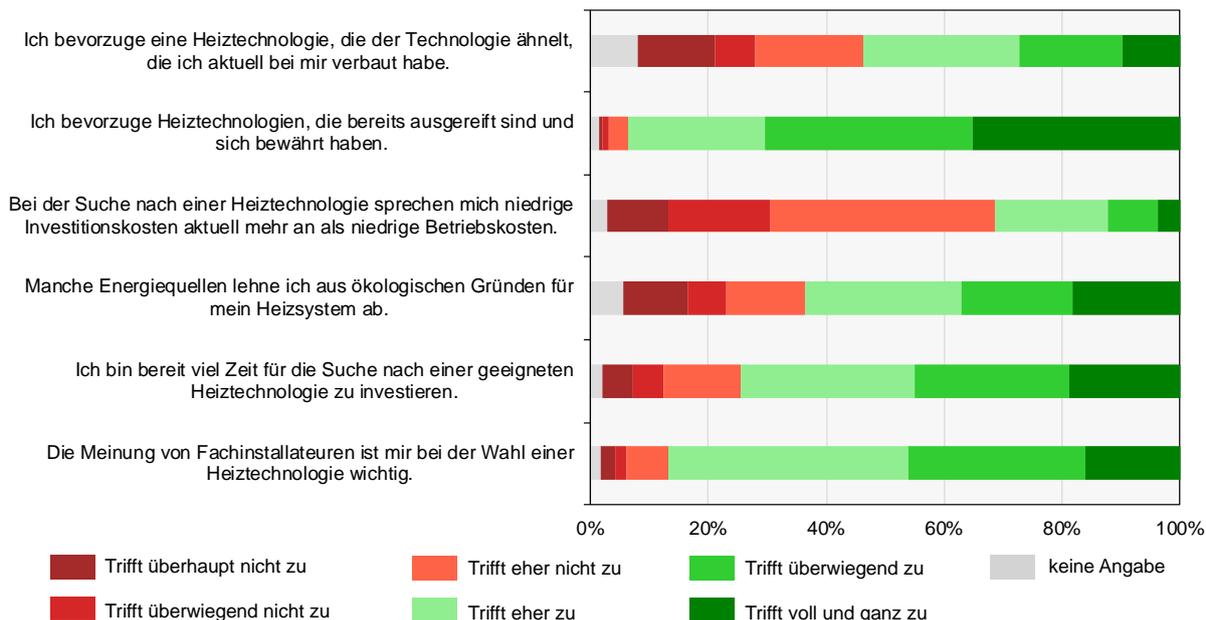
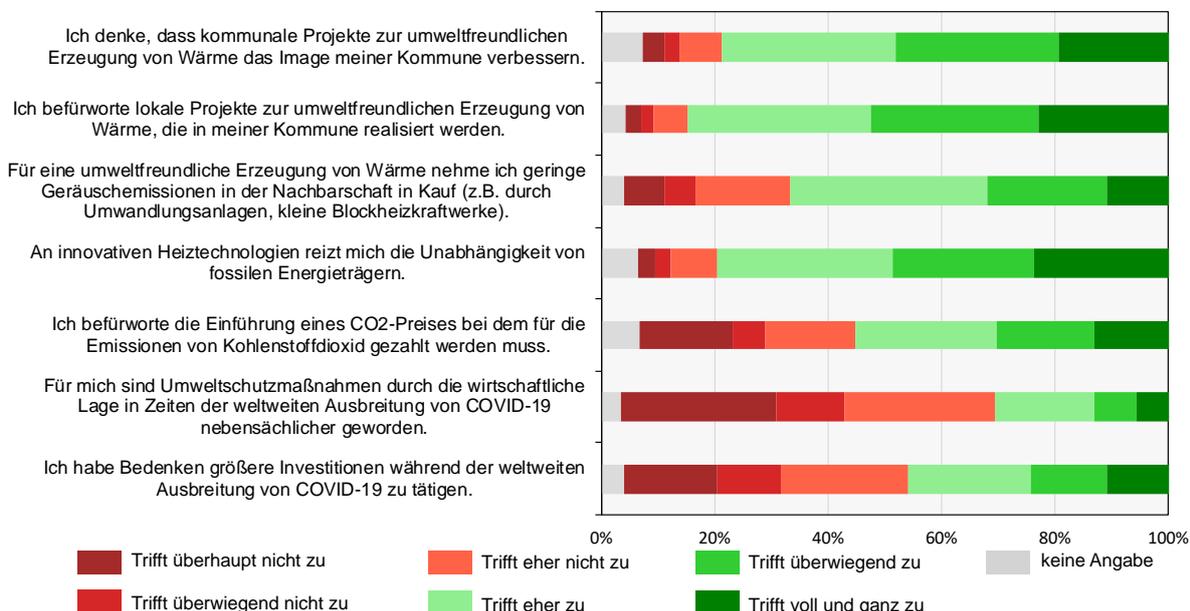


Abbildung 5: Ergebnisse der Likert-Skalen-Befragung der Pilotstudie (Teil 2)



2.2.2 Schnittstelleneinbettung der Qualitative Interviews potentieller Adopter*innen und Fragestellung

Schnittstellenaufgabe der qualitativen Interviews ist es, empirische Daten zu erfassen, die die Auswahl der Attributdimensionen des DCE inhaltlich begründen und einen Bezug zum tatsächlichen Wahlverhalten herstellen. Wie in der gemeinsamen Veröffentlichung des Projektkonsortiums herausgearbeitet, stellt die qualitative Analyse von Interviewmaterial eine Möglichkeit dar, auf Ebene der Mikro-Perspektive verhaltens- und einstellungsbezogene empirische Informationen in Energiesystemmodelle zu integrieren (Senkpiel et al. 2020). Die in den Interviews zu erhebenden Daten sowie die im DCE abgebildete Auswahlentscheidung sollen Wahlentscheidungen zur Adoption bzw. Kaufverhalten bei innovativen Wärmetechnologien von Mieter*innen und Eigentümer*innen von Wohnungen und Häusern, bzw. Teilgruppen dieser, abbilden.

Da sich ein Teil der Projektfragestellung auf die Interaktion zwischen Akteuren bezieht, soll im Rahmen der qualitativen Analyse ein Fokus daraufgelegt werden, welche Konsequenzen durch die Interaktion mit Installateur*innen als eine vereinfacht betrachtete Akteursgruppe produziert werden und wie relevant diese für das Auswahlverhalten sein könnten. Der Fokus wurde auf die Gruppe der Installateur*innen gelegt, da diese sich im Rahmen von Diskussionen im Konsortium als besonders interessant herauskristallisiert haben.

Auf Grundlage von theoretischen Vorüberlegungen wurden in einer Pilotstudie zum DCE bereits die Attribute „Zeitaufwand der Informationssuche“ und „Hauptinformationsquelle“ exploriert. Die Gestaltung der Attributabstufungen „Zeitaufwand der Informationssuche“ und die Interaktionsbeziehung zum*zur Fachinstallateur*in bedurften weiterer Analyse, so dass diese in den qualitativen Interviews mit betrachtet wurden.

Aufgrund der begrenzten Ressourcen für zehn Interviews soll im Rahmen der qualitativen Analyse ein Fokus erstens daraufgelegt werden, welche Konsequenzen für die Wahlentscheidungen der Gruppe der potentiellen Adopter*innen relevant sind, und zweitens, welche gemeinsamen Kontingenzen in der Interaktion mit Installateur*innen eine Rolle spielen.

Die konkreten Fragestellungen sind:

- 1) Basierend auf Verbalverhalten von potentiellen Adopter*innen, welche Kontingenzen sind relevant für die Auswahl von Heiztechnologien bei potentiellen Adopter*innen?
 - a) Was sind individuelle Kontingenzen?
 - b) Wie werden die individuellen Kontingenzen gewichtet?
 - c) Was sind Kontingenzen in der Interaktion mit Installateur*innen?
 - d) Wie werden die Kontingenzen in der Interaktion mit Installateur*innen gewichtet?
- 2) Welche Kontingenzen müssten sich ändern, um das Kaufen einer erneuerbaren, innovativen Heiztechnologie wahrscheinlicher zu machen?

2.2.3 Durchführung, Auswertung und Ergebnisse der qualitativen Interviews potentieller Adopter*innen

Anders als ursprünglich geplant wurden die Interviews aufgrund der Covid-19-Pandemie online durchgeführt. Die Erhebung der Interviews mit potentiellen Adopter*innen fand vom 26.04.2021 bis 07.06.2021 statt.

Populations- und Stichprobenbeschreibung

Potentiell relevante Merkmale bei Kauf oder Auswahl von Heiztechnologien

Mit Personen assoziierte Merkmale die als relevant für die Kaufentscheidung von Heiztechnologien beschrieben werden sind u.a. der Haustyp (Einfamilienhaus, Zweifamilienhaus, Mehrfamilienhaus), die Eigentumsverhältnisse (Besitzen, Mieten) (Beyer et al., 2010) und der Zustand des Hauses (z.B. Neubau, Renovierung) (Kranzl et al., 2018). Diese Merkmale werden typischerweise auch zur Segmentierung in Energiemodellen herangezogen und sind deswegen für die Beschreibung der Stichprobe im Hinblick auf die Schnittstellengestaltung zu beachten. Ein relevantes Personenmerkmal scheint außerdem der Stand des Kaufprozesses zum Zeitpunkt der Erhebung zu sein (im Entscheidungsprozess, kürzlich abgeschlossener Kauf, länger zurückliegender Kauf), da dies Einfluss auf die Erfahrungen hat, welche die Personen im Rahmen eines Kaufprozesses und im Umgang mit einer Heiztechnologie machen konnten.

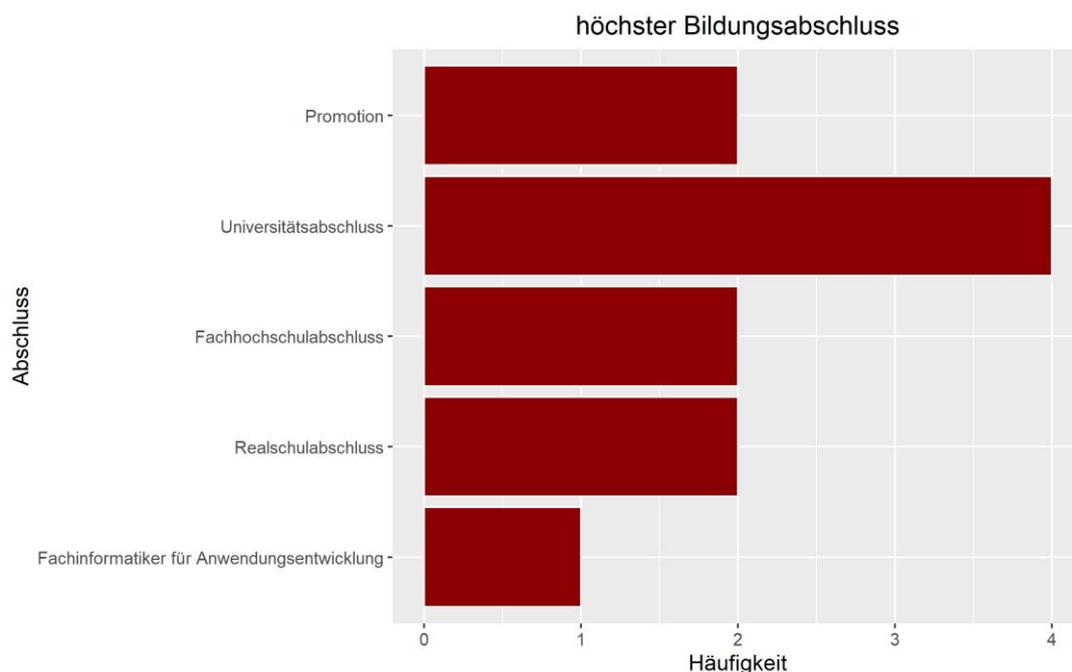
Aufgrund der begrenzten Anzahl möglicher Interviews (zehn laut Projektantrag) ist es sinnvoll eine homogene Stichprobe zu rekrutieren (Robinson, 2014), sodass wir bestimmte Einschlusskriterien im Studienaufruf formuliert haben. Auf Basis einer Anfallsstichprobe (convenience sample) über themenspezifische Internetseiten (Heiztechnikforum.eu; Heizforum.de; niedrigenergieforum.de; <https://www.facebook.com/co2online>) wurden Personen gesucht, die ein Einfamilienhaus besitzen, das ein Neubau ist oder durch die neue Heiztechnologie renoviert werden soll und die sich gerade im Entscheidungsprozess zum Kauf einer neuen Heiztechnologie befinden oder der Kauf noch nicht länger als drei Monate zurückliegt. Interessierte Personen konnten sich per E-Mail melden und daraufhin wurden Studien- und Teilnahmeinformationen, die Einverständniserklärung sowie Vorschläge für Interviewtermine verschickt. Es wurden so lange Interviews vereinbart bis in etwa abschätzbar war, dass die Zielgröße von 10 Interviews erreicht werden würde.

Zusätzlich zu den oben genannten Personen oder Personen assoziierten Merkmalen sollte man für die Stichprobenbeschreibung auch berücksichtigen, dass die verfügbare Zeit und das verfügbare Geld (Beyer et al., 2010) zu Unterschieden in der Gewichtung von Konsequenzen bei der Kaufentscheidung beitragen kann. Auch die geographische Verortung in Deutschland sollte miteinbezogen werden, da die unterschiedliche Verteilung bereits installierter Heiztechnologien in verschiedenen Regionen (Dena, 2017) ebenfalls von Relevanz sein könnte für die Kaufentscheidung, z.B. aufgrund von Empfehlungsverhalten von Installateur*innen oder Nachbarschaftsempfehlungen.

Merkmale der rekrutierten Stichprobe

Die Stichprobe besteht aus elf männlichen Teilnehmenden von ursprünglich vierzehn Interessentenbekundungen per E-Mail als Antwort auf unsere Forumsbeiträge. Von diesen vierzehn Personen vereinbarten dreizehn nach Zusenden des Informationsmaterials einen Interviewtermin. Zwei Personen erschienen nicht zum Interview und antworteten auf das Angebot für einen neuen Termin nicht mehr. Die elf Teilnehmenden waren zum Untersuchungszeitpunkt zwischen 29 und 58 Jahre alt und alle zu 100 % erwerbstätig mit mehr als 30 Std./Woche. Die Teilnehmenden hatten alle mindestens einen Realschulabschluss (siehe Abbildung 6) und ein monatliches Haushaltseinkommen von 3.600 € bis 5.000 € pro Monat (n = 4) oder 5.000 € pro Monat oder mehr (n = 5) oder sie haben keine Angabe gemacht (n = 2). Die Einschätzung der durchschnittlichen wachen Freizeit pro Woche inklusive des Wochenendes in Stunden schwankte stärker zwischen den Teilnehmenden (Min = 4, Max = 65, Mittelwert = 36.86, SD = 18.02; n = 11).

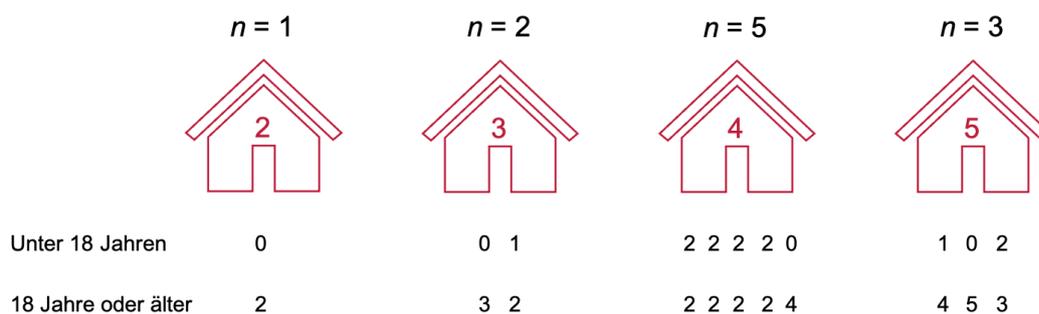
Abbildung 6: Höchster Bildungsabschluss



Anmerkung Die Auswahlmöglichkeiten waren: Kein Schulabschluss, Hauptschulabschluss, Realschulabschluss, Fachhochschulreife, Allgemeine Hochschulreife (Abitur), Abschluss an einer Fach-, Meister-, Technikerschule, Berufs- oder Fachakademie, Fachhochschulabschluss (z.B. Bachelor, Master, Diplom), Universitätsabschluss (z.B. Bachelor, Master, Diplom, Magister, Staatsexamen), Promotion, Ein anderer Bildungsabschluss, und zwar _____

Die Teilnehmenden waren Eigentümer eines Hauses und die Haushaltsgrößen lagen zwischen zwei bis fünf Personenhaushalten. Die Häufigkeiten der verschiedenen Haushaltsgrößen sowie die Anzahl der Personen unter 18 Jahren und 18 Jahre oder älter in jedem der elf Haushalte können der Abbildung 7 entnommen werden. Bei allen Teilnehmenden handelte es sich um Renovierungsmaßnahmen.

Abbildung 7: Haushaltsgröße



Die Teilnehmenden kamen aus den Bundesländern Bayern (n = 4), Hessen (n = 2), Baden-Württemberg (n = 2), Rheinland-Pfalz (n = 1), Niedersachsen (n = 1) und Sachsen (n = 1). Beim Lesen der Interviews zeigt sich, dass die Teilnehmenden tendenziell als „early adopter“ beschrieben werden können, da die meisten die ersten im Freundes- bzw. Bekanntenkreis sind, die sich mit dem Kauf einer neuen Heizung beschäftigen und erneuerbare Heiztechnologien in Erwägung ziehen.

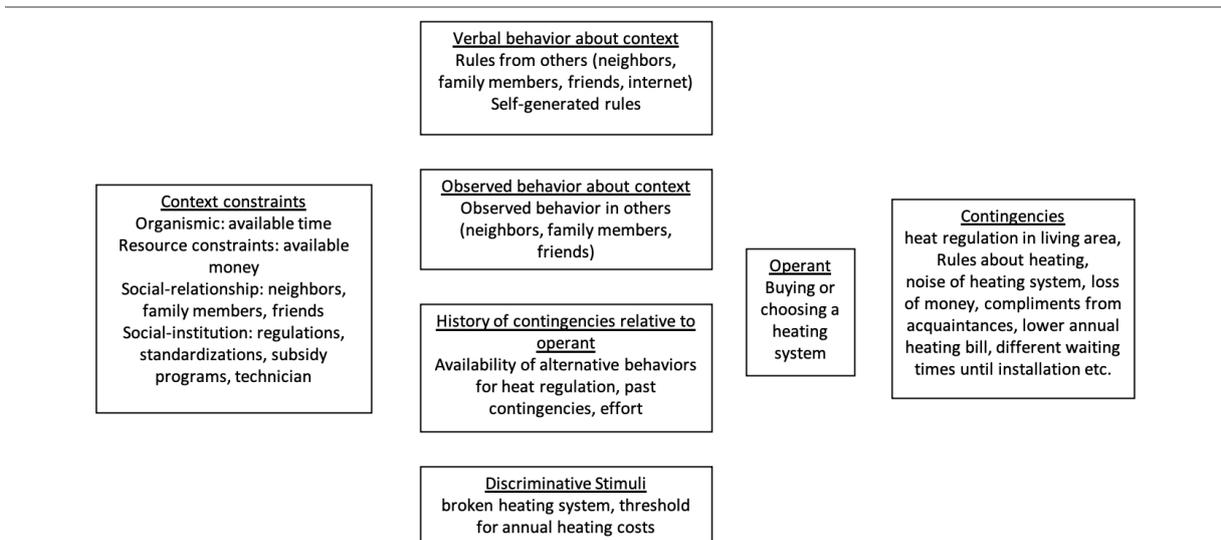
Methoden- und Materialbeschreibung

Zur Beantwortung der Fragestellungen eins und zwei wurden qualitative Interviews mit halbstrukturierten Leitfäden durchgeführt und anschließend mit einer Methode zur qualitativen Inhaltsanalyse ausgewertet. Darüber hinaus wurden durch die Teilnehmenden zwei Aufgaben (eine pile-sort Aufgabe von etwa zehn Minuten und eine freelist Aufgabe von etwa acht Minuten) während des Interviews bearbeitet und soziodemographische Merkmale anhand eines mündlich ausgefüllten Fragebogens (etwa fünf Minuten) erfasst. Der Interviewleitfaden (siehe 88) basiert auf einer selektionistischen Perspektive operanten Verhaltens (Skinner, 1981) und wurde vorab inklusive des technischen Ablaufs mit einer wissenschaftlichen Hilfskraft erprobt.

Wesentliche theoretische Terme zur Strukturierung des Leitfadens und zur Beschreibung von Kauf- und Auswahlverhalten von Heiztechnologien von Individuen werden in der Abbildung 8 mit möglichen Beispielen aufgeführt. Kern für das Verständnis operanten Verhaltens ist die Annahme, dass Verhalten in Interaktion mit einem jeweiligen Kontext Konsequenzen produziert und diese Konsequenzen die Auftretenswahrscheinlichkeit eines Verhaltens bzw. eines Operant (die theoretische Einheit von Verhalten) beeinflusst. In der vorliegenden Analyse geht es um das Kaufen bzw. Auswählen von Heiztechnologien, je nachdem in welchem Prozessschritt sich ein Individuum befindet. Je nach Kontext in dem ein Operant gezeigt wird, sind Konsequenzen mit unterschiedlichen Regelmäßigkeiten produzierbar, was zusammen betrachtet als Kontingenz bezeichnet wird. Zum Beispiel kann es sein, dass die Wahl einer Erd-Wärmepumpe in bestimmten Gebieten Deutschlands als Konsequenz lange Wartezeiten produziert bis zur Installation, da aufgrund von rechtlichen Regularien erst Sondergenehmigungen eingeholt werden müssen. Diskriminative Hinweisreize zeigen bestimmte Kontingenzbedingungen zwischen Operant und Konsequenzen an, sodass sie auf die Möglichkeit hinweisen bestimmte Konsequenzen zu produzieren. Beispielsweise kann ein kaputtes Heizungssystem im Winter ein diskriminativer Hinweisreiz für Frieren im Haus sein. In der selektionistischen Perspektive selektieren Konsequenzen Verhalten und beeinflussen so die zukünftige Auftretenswahrscheinlichkeit von Verhalten. Für die Verhaltensanalyse sind also vergangene Kontingenzen in Bezug auf bisherige Heizsysteme, Wahl- und Kauf von Heizsystemen und Heizverhalten im Haushalt relevant. Besonders bei Verhaltensweisen die selten oder zum ersten Mal gezeigt werden spielen das Verbalverhalten von anderen Personen, z.B. in Form von Empfehlungen oder das beobachtete Verhalten bei anderen eine wichtige Rolle (Schmitt, 1987). Das könnte zum Beispiel die Beobachtung sein, welches Heizsystem mein*e Nachbar*in benutzt.

Für die Analyse von Kauf- und Auswahlverhalten von Heizsystemen bei Adopter*innen haben wir Installateur*innen als eine potentiell interessante Gruppe von Interaktionspartner*innen identifiziert. Theoretisch gesehen sind sie, wie auch andere Personen, Teil des Kontextes und in Interaktion mit ihnen werden bestimmte Konsequenzen produziert, wie z.B. Verbalverhalten über Vor- und Nachteile der Installation unterschiedlicher Heiztechnologien. Innerhalb des verhaltensanalytischen Frameworks erlangt die Analyse solcher interpersonellen Kontingenzen bzw. „interlocking behavioral contingencies“ (Glenn, 1991; Glenn et al., 2016) mehr und mehr an Bedeutung, wenn es darum geht soziale oder kulturelle Prozesse zu verstehen (Cihon & Mattaini, 2020).

Abbildung 8: Begriffe der Verhaltensanalyse zur theoretischen Strukturierung des Leitfadens und zur Analyse des Kauf- und Auswahlverhaltens von Heiztechnologien durch potentielle Adopter*innen



Die Interviews fanden online über das Videokonferenzsystem Cisco Webex Meetings (Version 41.x) statt, wurden alle von der Autorin (wissenschaftliche Mitarbeiterin an der Technischen Universität Braunschweig mit Erfahrung im Durchführen von Interviews) durchgeführt und als Tonaufnahmen gespeichert. Bis auf einen Teilnehmenden schalteten alle die Videokamera für das Interview an. Nicht Teilnehmende Personen waren nicht anwesend, aber es gab teilweise Unterbrechungen durch ein klingelndes Telefon oder Familienmitglieder auf Seiten der Proband*innen. Zu Beginn stellte die Interviewerin sich vor, wiederholte die Ziele der Studie und holte die Einverständniserklärung ein. Fragen der Proband*innen sowohl zur eigenen Person als auch zu Studieninhalten wurden zu Beginn und auch im Verlauf der Interviews beantwortet.

Bei einem Teilnehmenden (VP 11) kam es während des Interviews zu technischen Schwierigkeiten, die aber behoben werden konnten. Ansonsten gibt es keine Auffälligkeiten, die im Postskriptum notiert wurden. Die Interviews dauerten zwischen anderthalb und zwei Stunden, sodass insgesamt etwa 17 Stunden Tonaufnahmen im Anschluss mit der Software MAXQDA Plus 2020 (Release 20.4.1) transkribiert wurden. Der Transkriptionsleitfaden (A.2.2) basiert auf den Regeln von Rädiker und Kuckartz (2019, Seiten 44-45). Die so erstellten Transkripte [1] stellen das Ausgangsmaterial für die qualitative Inhaltsanalyse dar.

Die qualitative Inhaltsanalyse nutzt die von Mayring beschriebene Methode (2010, 2017), die den Inhalt der Transkripte basierend auf vorab definierten deduktiven Kategorien strukturiert und die Inhalte dieser Kategorien anschließend induktiv abstrahierend zusammenfasst. Die kleinste Kodiereinheit sind bedeutungsvolle Phrasen und der Kodierkontext ist alles Interviewmaterial inklusive Postskriptum Notizen. Das angepasste Kodiersystem nach 10 % Materialdurchgang ist in A.2.3. Es baut auf den in Abbildung 8 beschriebenen Begriffen der Verhaltensanalyse auf. Zusätzlich enthält es eine Oberkategorie zur Beschreibung der technischen Voraussetzungen der Häuser (z.B. Neubau vs. Renovierung) und eine Kategorie „changes for buying innovative, renewable technologies“, die hilfreiche Fördernisse und zu behebende Hindernisse enthält für den Kauf von innovativen, erneuerbaren Heiztechnologien. Eine erst nach den Interviews hinzugefügte Kategorie „verbalizations

¹ An dieser Stelle ein großer Dank für die tolle Unterstützung durch die Praktikant*innen Tabea Schlender, Fabius Berner, Jan Nikolov und die wissenschaftliche Hilfskraft Anna-Sophia Heidrich bei der Transkription und Kodierung des Ausgangsmaterials.

during pile-sort task“ wurde notwendig, weil das Notieren der wesentlichen gesprochenen Inhalte während dieser Aufgabe im Interview zu schwierig war, sodass die Inhalte mittranskribiert wurden. Um eine quantitative Analyse von Worthäufigkeiten zu ermöglichen, wurde die Kategorie „corpus quantitative analysis“ hinzugefügt. Eine zunächst erwogene evaluative Kategorie zur Skalierenden Strukturierung der operant contingencies (Mayring, 2010; Seiten 50 - 114) wurde nicht kodiert, da das Datenmaterial hierfür nicht reichhaltig genug ist.

Die Interraterreliabilität wurde auf Basis von zwei Interviews (VP_Haushalt_1 und VP_Haushalt_5), die von zwei Kodierern kodiert wurden, in MAXQDA bestimmt. Bei einer Segmentüberlappung von 80 % lag die Interraterreliabilität bei 71,57 % (Range 0 % - 100 %). Kategorien mit niedrigen Werten wurden diskutiert und konsensuell angepasst. Die erneute, strengere Prüfung mit 90 % Segmentüberlappung ergab eine Inter-coder-Übereinstimmung von 78,33 % mit einer Range von 57,14 % bis 100 % und wurde als akzeptabel bewertet. Die restlichen Interviews wurden von einem Kodierer kodiert.

Ergebnisse

In welchem Prozessschritt befanden sich die Teilnehmenden und um welche Technologien ging es?

Fünf Teilnehmende befanden sich zum Zeitpunkt des Interviews im Kaufprozess, wobei erst ein Teilnehmender (VP_Haushalt_1) diesen Prozess abgeschlossen und die Technologie seit sechs Tagen vollständig installiert hatte (Tabelle 2). Vier Personen befanden sich im Auswahlprozess. Bei zwei Teilnehmenden liefen beide Prozesse für unterschiedliche Technologien gleichzeitig ab (VP_Haushalt_3 und VP_Haushalt_13).

Bis auf einen Teilnehmenden, der den Kauf der Heiztechnologie zum Zeitpunkt des Interviews abgeschlossen hatte, hatten die anderen Teilnehmenden noch keine Erfahrungen mit der Installation und dem Betrieb der Heiztechnologie bei sich zu Hause. Von den elf Teilnehmenden haben sich acht für eine Wärmepumpe als primäre Heiztechnologie entschieden und je eine Person für eine Scheitholzheizung, eine Gasbrennwertanlage und eine Brennstoffzellenheizung. Drei Personen nennen als Heiztechnologie einen Holzofen.

Dieser wird beschrieben als „Komfort-Ofen“ für die Gemütlichkeit und teilweise als Absicherung, z.B. „wir hätten noch zur Not einen Ofen, aber nur so einen Komfort-Ofen,“ (VP_Haushalt_1, Absatz 10).

Tabelle 2: Prozessschritte der Teilnehmenden und (geplante) Heiztechnologien

Teilnehmenden ID	Prozessschritt	Heiztechnologie
VP_Haushalt_1	Kauf (abgeschlossen)	Luft-Wärmepumpe, Holzofen
VP_Haushalt_2	Kauf	Holzheizung (Scheitholz), Solarthermie, Ölheizung als Backup
VP_Haushalt_3	Auswahl, Kauf	Wärmepumpe (Wahl; Typ noch nicht entschieden), Solaranlage (Kauf)
VP_Haushalt_4	Kauf	Gasbrennwertanlage
VP_Haushalt_5	Auswahl	Solewärmepumpe in Kombination mit einem Ringgrabenkollektor
VP_Haushalt_6	Auswahl	Luft-Wärmepumpe
VP_Haushalt_7	Kauf	Brennstoffzellenheizung, Holzofen
VP_Haushalt_10	Kauf	herunter modulierende Gasbrennwerttherme, Brauchwasser-Wärmepumpe
VP_Haushalt_11	Auswahl	Erdwärmepumpe, Photovoltaik, Holzofen
VP_Haushalt_12	Auswahl	Wärmepumpe (Typ noch nicht entschieden)
VP_Haushalt_13	Kauf, Auswahl	Luft-Wärmepumpe (Kauf), Photovoltaik (Wahl), elektrische Decken- und Wandheizung (Wahl)

Wie lange dauern die Prozessschritte und welche Verhaltensweisen sind wesentliche Bestandteile?

Szenarien zur Transformation hin zu erneuerbaren Heiztechnologien im Haushaltssektor müssen die Zeit berücksichtigen, die es dauert, den Bestand auszutauschen. Wichtige Aspekte sind dabei die Anteile der verschiedenen Heiztechnologien die aktuell im Bestand sind, aber noch nicht auf erneuerbaren umweltfreundlichen Technologien basieren, der Absatz von verschiedenen Heiztechnologien und die Nutzungsdauer der Technologien.

Im aktuellen Bestand sind 2019 etwa 75 % der Wohngebäude mit Öl- oder Gasheizung ausgestattet und etwa 70 % der Wohneinheiten (DENA, 2022). In Wohngebäuden sind davon 30 % Ölzentralheizungen, 41 % Gaszentralheizungen und 5 % Erdgas-Etagenheizung. In Wohneinheiten sind die Anteile 25 % Ölzentralheizungen, 36 % Gaszentralheizungen und 10 % Erdgas-Etagenheizungen (Gebäudeforum klimaneutral, 2022). Auf Wärmepumpen entfallen 3 % (Wohngebäude) und 2 % (Wohneinheiten) und auf Holzkessel 3 % sowohl in Wohngebäuden als auch in Wohneinheiten (Gebäudeforum klimaneutral, 2022).

Der Absatz von fossilen Wärmeerzeugern, also Ölheizungen und Gasheizungen, die neu eingebaut wurden lag 2020 bei etwa 73 % und der von Wärmepumpe und Biomasse bei etwa 19 % (Gebäudeforum klimaneutral, 2022, eigene Berechnung). Die Anteile unterscheiden sich dabei zwischen Renovierungen und Neubauten. In Neubauten wurden 47 % erneuerbare Heiztechnologien verbaut (Wärmepumpe und Biomasse), während in Bestandsbauten 7 % Wärmepumpen und 1 % Biomasse verbaut wurden und noch etwa 93 % auf fossile Verbrennungsheizungen entfielen (Gebäudeforum klimaneutral, 2022, eigene Berechnungen).

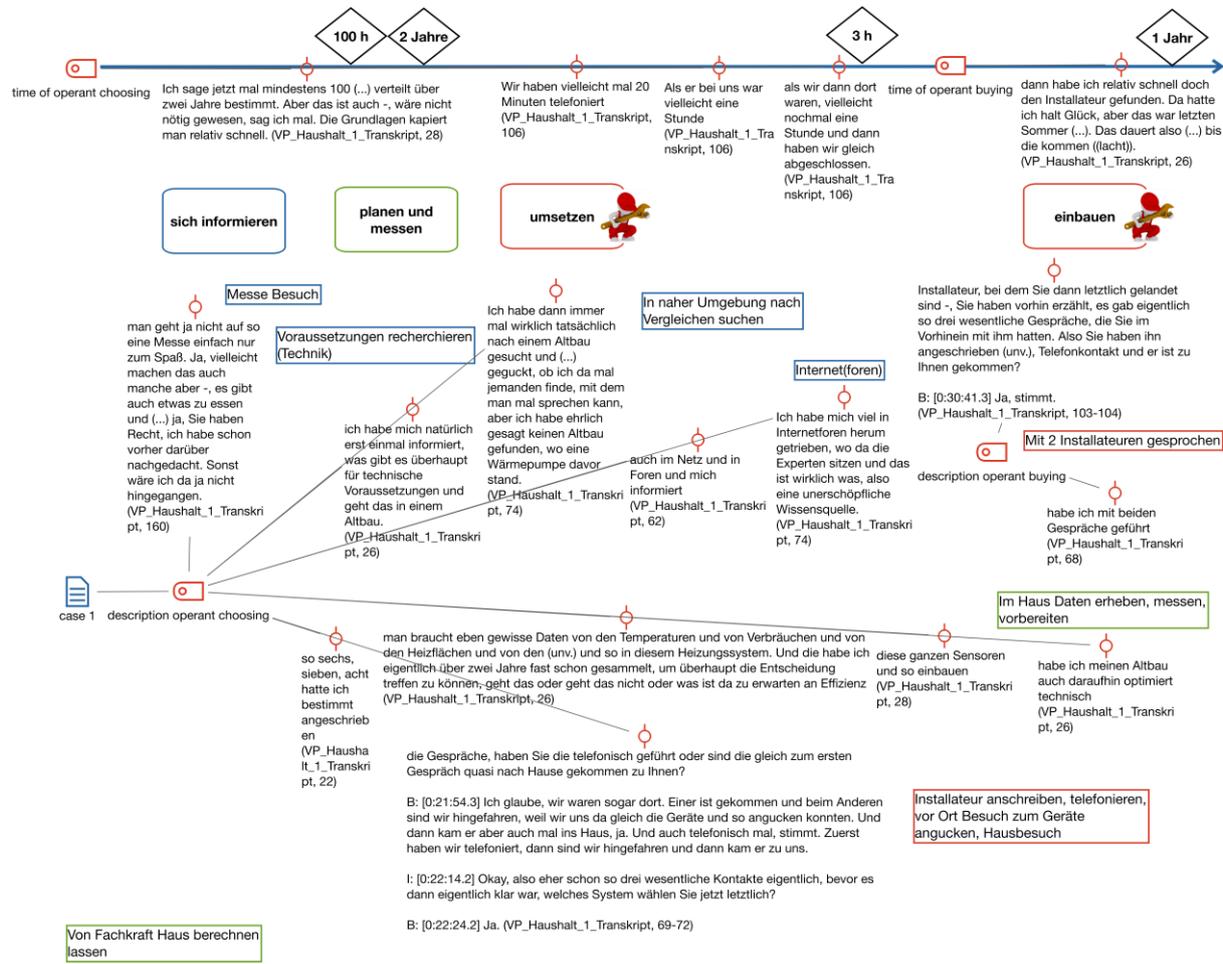
Die jährliche Austauschrate von Heizungsanlagen im Gebäudebestand lag 2015 bei 2,5 bis 3 % (DENA, 2022). Das Durchschnittsalter von Heizungsanlagen betrug 2019 etwa 17 Jahre (DENA, 2022). Etwa 25 % der Heizungsanlagen sind älter als 25 Jahre und ungefähr 13 % sind zwischen 15 und 19 Jahren alt (Gebäudeforum klimaneutral, 2022).

Angesichts der Notwendigkeit die Transformation hin zur Nutzung erneuerbarer Energien im Haushaltssektor voranzutreiben, ist allerdings auch ein Blick darauf interessant, wie lang es dauert, bis Personen für eine Bestandsrenovierung eine Heiztechnologie ausgewählt und gekauft haben und welche Verhaltensweisen Bestandteil dieser Prozessschritte waren. Da wir annehmen, dass der Zeitaufwand, der mit der Wahl und dem Kauf einer Heiztechnologie zusammenhängt, eine relevante Konsequenz sein könnte, kann diese Analyse auch dabei helfen, Aspekte zu identifizieren, deren Beschleunigung ein Fördernis hin zu mehr erneuerbaren Heiztechnologien darstellen könnte.

Zur Analyse wurden in MAXQDA mit Hilfe des visuellen Analysetools MaxMaps konzeptuelle Abstraktionen anhand der Codes *description operant* und *time of operant* jeweils für die dazugehörigen Oberkategorien *operant contingencies choosing heating system* und *operant contingencies buying heating system* für jeden Teilnehmenden einzeln erstellt und anschließend die abstrahierten Verhaltensweisen mit einer Übersicht der unterschiedlichen zeitlichen Dauern zusammengefasst.

Exemplarisch sind hier die individuelle Konzeptkarte des Teilnehmers VP_Haushalt_1 (Abbildung 9) und des Teilnehmers VP_Haushalt_4 (Abbildung 10) dargestellt. In der Gruppe der hier Untersuchten ist Fall 1 als typischer Fall zu sehen, allerdings mit einer langen Auswahlphase. Im Vergleich zu den anderen Fällen hat Fall 4 eine deutlich kürzere Auswahlphase. Die Konzeptkarten der anderen Teilnehmenden befinden sich im Anhang A.2.4.

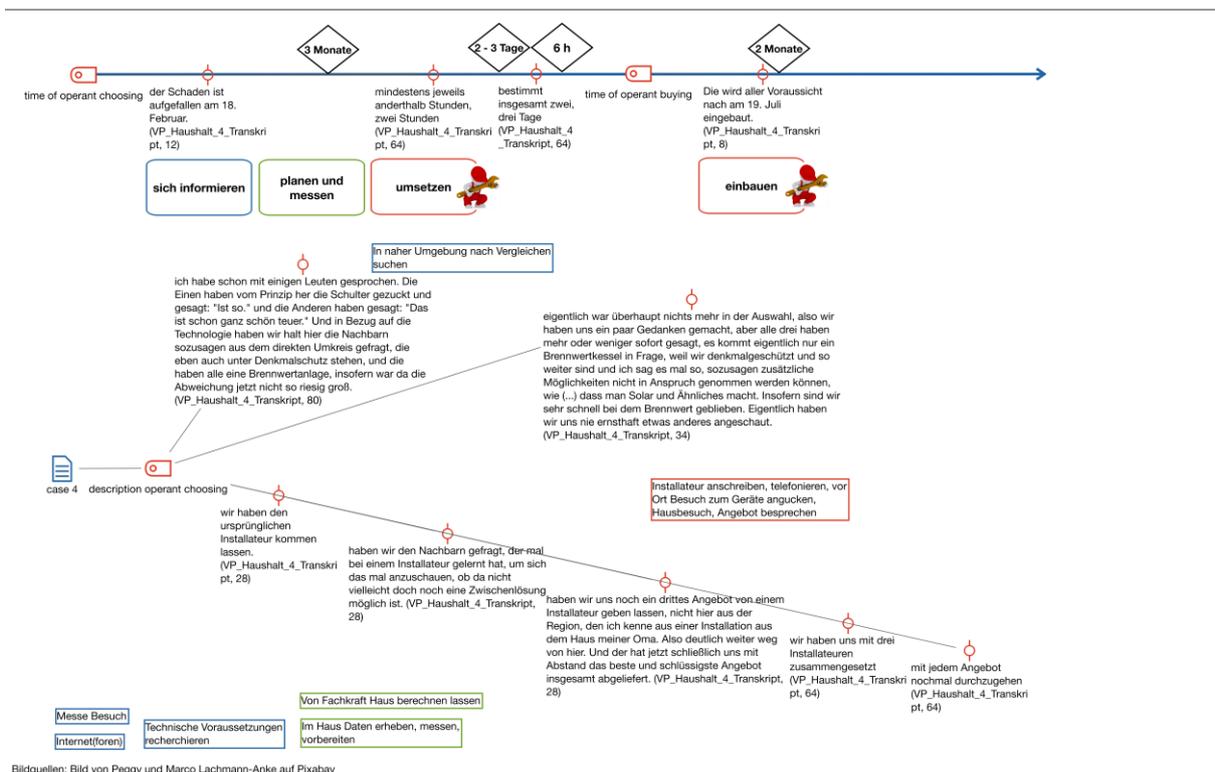
Abbildung 9: Konzeptkarte der Prozessschritte, Verhaltenssequenzen und deren zeitlicher Dauer für Fall 1



Fall 1 hat insgesamt etwa 100 Stunden verteilt über zwei Jahre darauf verwandt sich zu informieren und im Haus Daten zu erheben, um zu entscheiden, was für Heiztechnologien möglich sind und wie effizient diese wären. Zu der abstrahierten Verhaltensweise „sich informieren“ gehören hier exemplarisch der Besuch einer Fachmesse, das Recherchieren von technischen Voraussetzungen, das Konsultieren von Expert*innen in Internetforen und das Suchen nach Altbauten in der Umgebung mit einer Wärmepumpe. Die Suche nach Austausch mit Personen, die bereits eine Wärmepumpe in einem Altbau installiert haben, um somit die Möglichkeiten des Modell- und Instruktionslernens zu nutzen, war für Fall 1 nicht erfolgreich. Beispiele für die abstrahierte Verhaltensweise „planen und messen“ sind das Anbringen von Sensoren im Haus und das Erheben von Messwerten, wie Temperaturen und Verbräuchen über die Zeitspanne von etwa zwei Jahren. Die Teilnehmenden unterscheiden sich dahingehend, wie viel sie selber planen und messen und wieviel sie davon an eine Fachkraft, z.B. eine Energieberatung oder ein Architekturplanungsbüro, abgeben. Fall 6 hat bspw. eine Energieberatung dafür hinzugezogen und beschreibt die Abwägung so: „habe ich selber noch ein bisschen rumgelesen, manche Leute fangen auch an selber zu messen und erstmal (...) einen Heizungsabgleich zu machen. (...) Da hatte ich dann keine Lust drauf. Das war mir zu viel Aufwand. Da hätte man dann wahrscheinlich mehrere Winter messen dürfen und tun und machen und erstmal Geräte kaufen.“ (Absatz 5). Fall 4 hat direkt nach der Informationsphase die Umsetzung mit einem Installateur begonnen. Die abstrahierte Verhaltensweise „umsetzen“ der Auswahl erfolgt in der Regel in Interaktion mit einem Installateur oder einer Installateurin. Fall 1 hat sechs bis acht

Installationsbüros angeschrieben und mit zwei von ihnen ein Gespräch geführt. Die Zeit für die Phase der Umsetzung in der Interaktion mit dem Installateur hat in etwa 3 Stunden gedauert und bestand aus einem Telefonkontakt, einem Hausbesuch und einem Gespräch in der Firma des Installateurs mit Kaufabschluss. Betrachtet man die anderen Fälle, scheint es eine geteilte Erfahrung, dass die Interaktion mit den Installateur*innen, was die Umsetzung angeht, relativ kurz und ähnlich verläuft und zumeist aus den Verhaltensweisen besteht den*die Installateur*in anzuschreiben (z.B. per E-Mail), zu telefonieren, einen Besuch in der Firma wahrzunehmen (evtl. auch um sich Geräte anzuschauen), einem Hausbesuch, das Einholen von Angeboten und teilweise wird in dieser Phase auch die Herstellerfirma kontaktiert. Nur bei Fall 1 ist der Einbau zum Zeitpunkt des Interviews schon erfolgt, aber trotz vorheriger eigener Planung und Kauf beim Installateur betrug die Wartezeit hier etwa ein Jahr „dann habe ich relativ schnell doch den Installateur gefunden. Da hatte ich halt Glück, aber das war letzten Sommer (...). Das dauert also (...) bis die kommen ((lacht)).“ (Absatz 26). Obwohl bei Fall 4 zum Zeitpunkt des Interviews der Einbau noch nicht erfolgt ist, beträgt hier die voraussichtliche Wartezeit bis zum Einbau der Gasbrennwertanlage nur 2 Monate.

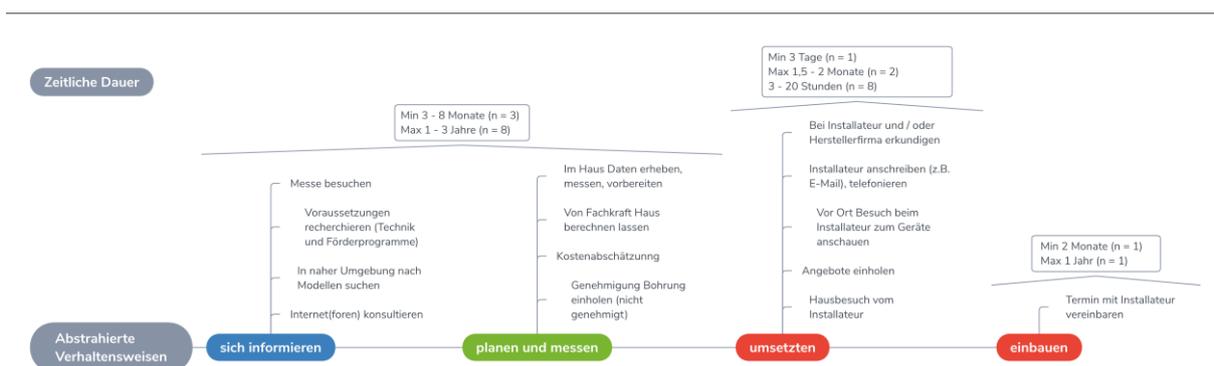
Abbildung 10: Konzeptkarte der Prozessschritte, Verhaltenssequenzen und deren zeitlicher Dauer für Fall 4



Im Vergleich zu den Fällen, die mehr Zeit auf die abstrahierten Verhaltensweisen sich informieren sowie planen und messen verwendet haben (vergleich Abbildung 11 für die zusammenfassende Darstellung aller Fälle), hat Fall 4 hier einen deutlich kürzeren Zeitraum angegeben (3 Monate vs. etwa 2 Jahre). Die Verteilung der unterschiedlichen Bestandteile der abstrahierten Verhaltensweisen ist in dem Zusammenhang interessant. Während beispielsweise Fälle 1-3 viel Information selber recherchiert haben und wenig Interaktion in der Umsetzung mit dem Installateur haben, hat Fall 4 mehr Codes, die die Interaktion mit dem Installateur betreffen. Eine mögliche Erklärung hierfür könnte der bei Fall 4 identifizierbare relevante diskriminative Hinweisreiz sein, der die verfügbare Zeit begrenzt. Hier lag ein Schaden des bisherigen Heizsystems vor und außerdem wurde die Auswahl möglicher Heizsysteme durch die Kontextrestriktion Denkmalschutz eingeschränkt.

Es ist zu erwägen, inwieweit die unterschiedlich langen Wartezeiten auf den Einbau einer neuen Heizung mit der Neuheit der Technologie bzw. der Verfügbarkeit entsprechend qualifizierter Installateur*innen zusammenhängen könnte. Eine zeitliche Diskrepanz von über einem halben Jahr zwischen einer etablierten und einer innovativen Technologie würde dann eine mögliche Stellschraube für Veränderungen sein, um die Transformation zu beschleunigen. So wäre es möglich, auch bei Vorliegen von diskriminativen Hinweisreizen, wie einer defekten Heizung, erneuerbare Technologien tatsächlich in die Auswahlentscheidung einzubeziehen und den zeitlichen Aufwand insgesamt zu reduzieren und somit eine potentiell wesentliche Konsequenz zu verändern.

Abbildung 11: Zusammenfassung der abstrahierten Verhaltensweisen und deren zeitliche Dauer



Welche Kontingenzen sind relevant für die Auswahl von Heiztechnologien bei potentiellen Adopter*innen? (Fragestellung 1)

Die Fragestellung 1 gliedert sich in vier Unterpunkte: a) Was sind die individuellen Kontingenzen? b) Wie werden die individuellen Kontingenzen gewichtet? c) Was sind Kontingenzen in der Interaktion mit Installateur*innen? d) Wie werden die Kontingenzen in der Interaktion mit Installateur*innen gewichtet?

Die Analyse der individuellen Kontingenzen sowie der Kontingenzen in Interaktion mit Installateur*innen erfolgte anhand der kodierten Codes in den Kategorien *operant contingencies choosing heating system – contingencies* und *operant contingencies choosing heating system – interlocking contingencies technicians*. Die kodierten Textsegmente wurden mit Hilfe des Analyse Tools „Summary-Grid“ pro Fall zusammengefasst und mögliche Kontingenzdimensionen formuliert. Die Kontingenzdimensionen wurden anschließend in einer „Summary-Tabelle“ exportiert, zu neuen Subcodekategorien zusammengefasst, im Kodiersystem ergänzt und kodiert. Die Kodierung mit den induktiv am Textmaterial erarbeiteten Subcodekategorien ermöglicht es, die Fragen nach der Gewichtung der Kontingenzen zu beantworten. Zu diesem Zweck wurden die Codehäufigkeiten analysiert, mit denen ein Code in den elf Dokumenten vorkommt. Diese Analyse informiert darüber, wie viele der Adopter*innen eine Kontingenzdimension benannt haben. Als zweiter Indikator für die Wichtigkeit kann herangezogen werden, wie viele der Textsegmente auf eine Subcodekategorie entfallen, also wie viele der insgesamt kodierten Textsegmente auf eine bestimmte Kontingenzdimension entfallen. Diese Analyse informiert darüber, wie oft über eine bestimmte Kontingenzdimension über alle Teilnehmenden hinweg betrachtet, gesprochen wurde. Abbildungen 12 und 13 zeigen die jeweiligen Ergebnisse für die individuellen Kontingenzen. Die Betrachtung beider Auswertungen ist interessant, weil deutliche Diskrepanzen in der Rangfolge Hinweise darauf geben können, dass einzelne Adopter*innen eine Kontingenz als sehr wichtig einschätzen und sehr viel darüber reden, dies aber nicht die Wichtigkeit widerspiegelt, die die Gesamtheit der untersuchten Gruppe einer Kontingenz beimisst.

Was sind die individuellen Kontingenzen und wie werden sie gewichtet?

Für 9 von 11 Teilnehmenden, also 82 % (siehe Abbildung 12), war die Passung zu anderen Systemen, die bereits im zu renovierenden Haus vorhanden sind oder zusätzlich installiert werden sollen wichtig für die Auswahlentscheidung. Oft ging es hier um die Kompatibilität mit anderen erneuerbaren Energietechnologien, insbesondere Photovoltaik-Anlagen (PV-Anlagen). Fall 13 beschrieb dies so: "Voraussetzung, dass dieses SG-Ready-Flatrate mit dabei ist, weil es geht ja im Prinzip mir darum, dass die Wärmepumpe auch mit der Solaranlage kommunizieren kann." (Absatz 10). Ebenso wichtig waren die einmaligen monetären Investitionskosten in Euro, gefolgt von wiederholt auftretenden monetären Kostenersparnissen durch geringere Heizkostenrechnungen (von 64 % benannt) sowie der wiederholt auftretende Zeitaufwand in Stunden für den Betrieb eines Heizsystems, welcher bei 55 % der Teilnehmenden als Kontingenzen bei der Auswahlentscheidung berücksichtigt wurde. Bei den wiederholt auftretenden monetären Kostenersparnissen ging es vor allem um den Vergleich zu öl- oder gasbasierten Heizsystemen, z.B. „hoffentlich dann auch eine deutliche Kostenersparnis, weil nämlich die CO₂-Bepreisung des Gases ja nach und nach steigen wird.“ (Fall 5, Absatz 32). Auch der wiederholte zeitliche Aufwand für Pflege und Betrieb eines Heizsystems werden berücksichtigt. Diese gehen zwar bei vielen erneuerbaren Heiztechnologien, ähnlich wie bei öl- oder gasbasierten Heizungen gegen Null, aber insbesondere bei Scheitholzheizungen oder Pelletheizungen werden Reinigungsaufwand und Lageraufwand für den Rohstoff mitberücksichtigt, z.B. „Es wäre noch eine Scheitholzheizung gewesen, ist aber für mich nicht infrage gekommen, weil ich mich ums Holz und so weiter nicht kümmern will und auch keine Zeit dafür habe.“ (Fall 7, Absatz 33).

Abbildung 12: Gewichtung individueller Kontingenzen des Auswahlverhaltens anhand der Auftretenshäufigkeit bei den 11 betrachteten Adopter*innen



Für jeweils 5 von 11 Teilnehmenden (45 %) waren die Kontingenzen Art des Energieträgers, ob es sich um eine CO₂-arme und/ oder umweltfreundliche Technologie handelt, wie groß der einmalige Planungsaufwand in Stunden für die neue Heiztechnologie ist, ob das System die gewünschte Raumtemperatur und Komfort bereitstellen kann und wie optimal ein Heizsystem dimensioniert werden kann, ein relevanter Abwägungsaspekt bei der Auswahlentscheidung.

Die Kategorie Art des Energieträgers umfasst Präferenzen, die eng mit dem jeweiligen Rohstoff und der darauf basierenden Technologie assoziiert sind. Diese Präferenzen fußen zumeist in Begründungen, die andere Kontingenzen benennen, wie z.B. monetäre Konsequenzen, wurden aber so

deutlich als Präferenz gegenüber einem bestimmten Energieträger gefasst, dass wir sie als gesonderte Kategorie codiert haben. Besonders deutlich wird dies an Textauszügen von Fall 6: „das Wasserstoff-System habe ich nicht tatsächlich in Erwägung gezogen, da bin ich tatsächlich nur drüber gestolpert und habe gleich gesagt: "Oh, nette Sache, aber das kommt auf gar keinen Fall in Frage."“ (Absatz 35). Gründe waren sowohl das Überschreiten einer preislichen Restriktion für die Investitionskosten „Es gibt ja auch Leute, die bauen sich (...) ein Wasserstoffsystem in das Haus. Gibt es ja mittlerweile auch zu kaufen (...) das fängt dann bei 70 - 80.000 an, so weit würde ich nicht gehen. Das ist dann Liebhaberei, das ist Interesse, das ist gut, das ist schön, dass das Leute machen, aber da wäre dann meine Hemmschwelle doch zu niedrig, oder niedriger.“ (Absatz 33) sowie die Einschätzung, dass Wasserstoff sinnvoller in anderen Bereichen, wie z.B. im Fernverkehr oder für chemische Prozesse in der Industrie (Absatz 39) als beim Heizen einsetzbar ist „Wasserstoff kann man sinnvoller nutzen, als damit zu heizen.“ (Absatz 37). Als dritten Grund führt Fall 6 an, dass die Wasserstoff Technologie noch nicht ausgereift sei (Absatz 35) und holzbasierte Heizungen kommen ebenfalls nicht in Frage, da Holz eine begrenzte Ressource sei „Holzbasierte Heizung würde ich nicht nehmen wollen, also Pellets oder so etwas.“ (Absatz 35) und „Ich glaube, dass wenn alle das tun, dass das dann nicht mehr so toll ist. (...) Also die Pellets als Abfallprodukt zu benutzen finde ich gut, die extra zu produzieren, um damit heizen zu können, ist wiederum nicht so ganz toll. (...) Und dann gibt es auch nicht mehr genug davon und dann wird da wieder Raubbau mit getrieben. Idealerweise lässt man die Wälder stehen, so gut es geht und nutzt nur den entsprechend dafür aufgeförfsteten Bereich und die Abfälle, die in der Produktion von Möbeln oder so verwendet werden.“ (Absatz 41).

Die Wichtigkeit der umweltrelevanten Konsequenzen wurden z.B. von Fall 5 so beschrieben „Naja, ganz klar war es so eigentlich der Umweltgedanke. Sprich also, CO₂-Fußabdruck reduzieren.“ (Absatz 66). Für 2 Teilnehmende war auch die Kongruenz zu bereits gezeigten umweltfreundlichen Verhaltensweisen relevant, z.B. „ich bin immer schon so ein bisschen auf dem Weg halt regenerative -, was weiß ich, Solaranlagen hatte ich schon ganz lang und fahre halt auch wenig Auto und all dieses ganze Zeug, ja. Ich fliege auch nicht und (...) da überlegt man halt immer, was könnte man noch machen. Und da kam ich halt irgendwann -, bin ich auf die Idee gekommen, Heizung. Das ist auch ein riesen Brocken, den man mal angehen müsste.“ (Absatz 100). Trotz des hohen zeitlichen Planungsaufwandes, der in dieser Gruppe der Teilnehmenden beschrieben wird, mit eher 1 bis 3 Jahren als 3 bis 8 Monate, wird diese Kontingenz von nur 45 % benannt. Das könnte daran liegen, dass wir es hier mit einer 'early adopter' Gruppe zu tun haben, die oft technisches Interesse gezeigt hat, viel monetäre Ressourcen hat und bis auf einen Teilnehmenden keinen Zeitdruck aufgrund kontextbedingter Faktoren hatte. In der Kategorie gewünschte Raumtemperatur und Komfort ist enthalten, inwieweit das Heizsystem, auch in Verbindung mit dem eigenen Verhalten, in der Lage ist, die Erwartungen an die Wärmeregulation im eigenen Haus zu erfüllen: „Bei einer Flächenheizung haben wir ja die, also, Wärmestrahlung. Das ist ein ganz anderes Empfinden sozusagen.“ (Absatz 69) [...] „es ist jetzt nicht so, wenn ich jetzt hier mal komme und mir ist jetzt spontan viel zu kalt oder ich habe irgendwo in irgendeinem Zimmer habe ich die Heizung nicht angehabt im Winter, komme da rein und will es da schnell warm haben, dann drehe ich jetzt hier die Heizung auf fünf und eine Viertelstunde später ist das Zimmer warm. Das funktioniert so mit einer Flächenheizung ja nicht.“ (Absatz 69). Die Kategorie Optimalität der Dimensionierung des Heizsystems umfasst Äußerungen der Teilnehmenden, die sich mit der möglichst optimalen bzw. effizienten Auslegung und (Größen-)Dimensionierung des in Erwägung gezogenen Heizsystems beschäftigen, z.B. Fall 12 „das ist nicht irgendwie abschätzen von der Situation oder ich glaube zu wissen, dass es so geht, sondern da steckt wirklich knallharte Berechnung dahinter.“ (Absatz 39).

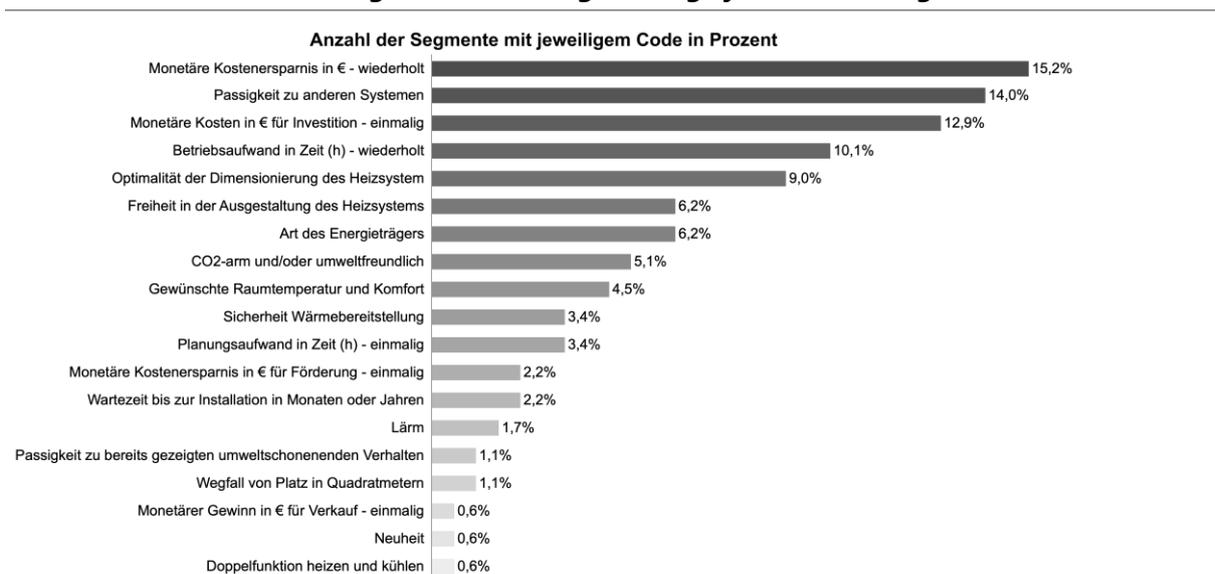
Für 4 von 11 Teilnehmenden (36 %) spielten die Freiheit in der Ausgestaltung des Heizsystems (z.B. Fall 11 Absatz 80 „im Internet recherchieren und dann einfach so machen, wie ich das will.“), die Wartezeit bis zur Installation in Monaten oder Jahren (z.B. Fall 6 Absatz 95 „dann könnte es im

schlimmsten Fall doch wieder eine Gastherme werden, weil die halt verfügbar ist und ich nicht irgendwie erst eine große Auslegung von einer Wärmepumpe machen müsste.“) und die Sicherheit der Wärmebereitstellung (z.B. Fall 3 Absatz 12 „da bin ich natürlich daran interessiert, dass, wenn es vielleicht irgendwann mal deutlich kälter sein sollte, dass das Ding nach wie vor funktioniert.“) eine Rolle bei der Auswahl einer Heiztechnologie.

Für 3 von 12 Teilnehmenden (27 %) war die einmalige monetäre Kostenersparnis durch Förderung relevant, z.B. Fall 1 Absatz 44 „wenn man sich zwei Jahre mit dem Gedanken beschäftigt, dann gewöhnt man sich irgendwann mal -, weiß man einfach, das kostet halt so viel (...) und dann mit der Förderung zusammen war es dann schon machbar. Aber da war schon, sag ich mal, Idealismus dabei.“.

Von zwei oder einer Person wurden als relevante Kontingenzen für die Auswahlentscheidung eine Passigkeit zu bereits anderen gezeigten umweltschonenden Verhalten, der potentiell selbst erlebte Lärm, die Neuheit der Technologie (Fall 3 Absatz 24 „wenn ich mich jetzt für ein System entscheide, dann sollte das einigermaßen modern sein“), der einmalige monetäre Gewinn in Euro bei Verkauf des renovierten Hauses im Sinne einer Wertsteigerung durch die Investition ins neue Heizsystem, der Wegfall von Platz in Quadratmetern durch zu lagernde Pellets und die positiv bewertete Kontingenz einer möglichen Doppelfunktion von heizen und kühlen bei Wärmepumpenanlagen.

Abbildung 13: Gewichtung individueller Kontingenzen des Auswahlverhaltens anhand der relativen Häufigkeit in allen kodierten Textsegmenten der Kategorie „operant contingencies choosing heating system – contingencies“



Obwohl die Kontingenzen der Passigkeit zu anderen Systemen, die wiederholt auftretende Kostenersparnis, die einmaligen Investitionskosten und der wiederholte Betriebsaufwand eine andere Reihenfolge aufweisen, belegen sie auch beim Wichtigkeitsindikator der relativen Häufigkeit in allen kodierten Textsegmenten (siehe Abbildung 13) die ersten vier Rangpositionen. Auch in Bezug auf die anderen Kontingenzen gibt es keine wesentlichen Unterschiede: Die Kategorien auf den letzten sechs Rangplätzen, welche von zwei bzw. einem Teilnehmenden benannt wurden und auch die Kontingenz Kategorien, die auf die mittleren Rangplätze fallen, unterscheiden sich nicht.

Was sind Kontingenzen in der Interaktion mit Installateur*innen und wie werden sie gewichtet?

In der Interaktion mit Installateur*innen spielten bei 7 von 11 Teilnehmenden (64 %) eine wahrgenommene mangelnde Kompetenz bei den Installateur*innen und Schwierigkeiten in der Kontaktaufnahme eine Rolle in Bezug auf ihr Auswahlverhalten (siehe Abbildung 9). Fall 10 beschreibt beispielsweise sich nicht auf die Kompetenz des Installateurs bzw. der Installateurin bei der Auslegung zu verlassen und habe es selber gemacht: „Ich habe nach seiner Kompetenz der Auslegung nicht mehr gefragt“ [...] „ich glaube für meine Bedürfnisse das besser zu verstehen und auszulegen, als er das hätte für mich machen können. Und er hat es ja auch zugegeben.“ (Absatz 78). Bei Fall 7 scheint die Wahrnehmung einer mangelnden Kompetenz im Bereich Wärmepumpen Anlagen auch dazu geführt zu haben, dass der Austausch diesbezüglich nicht mehr gesucht wurde, insbesondere da drei Installateure vorher schon eine Brennstoffzellenheizung empfohlen hätten „ich sehe da meinen Heizungsbauer, den ich jetzt gewählt habe nicht wirklich als Experten, weshalb es dann auch wenig Sinn macht, dann mich mit ihm da groß auszutauschen.“ (Absatz 97). Diese wahrgenommene mangelnde Kompetenz insbesondere in Bezug auf Wärmepumpen Anlagen scheint außerdem zu Schwierigkeiten in der Kontaktaufnahme beizutragen, z.B. Fall 13 „an der Wärmepumpe sind drei Anschlüsse dran. Einmal der Strom, der Vorlauf und der Rücklauf, ne. So, das kann eigentlich -, aus meiner Sicht müsste das jeder Handwerker können, aber da will keiner so richtig ran“ (Absatz 39). Die Kategorie Schwierigkeiten in der Kontaktaufnahme beinhaltet vor allem Probleme der initialen Kontaktherstellung und einer als angemessen empfundenen Antwortzeit durch die Installateure, z.B. Fall 1 „so sechs, sieben, acht hatte ich bestimmt angeschrieben und geantwortet haben mein bisheriger Installateur und eben dieser Wärmepumpenexperte.“ (Absatz 22), „dann habe ich relativ schnell doch den Installateur gefunden. Da hatte ich halt Glück, aber das war letzten Sommer (...). Das dauert also (...) bis die kommen ((lacht)).“ (Absatz 26).

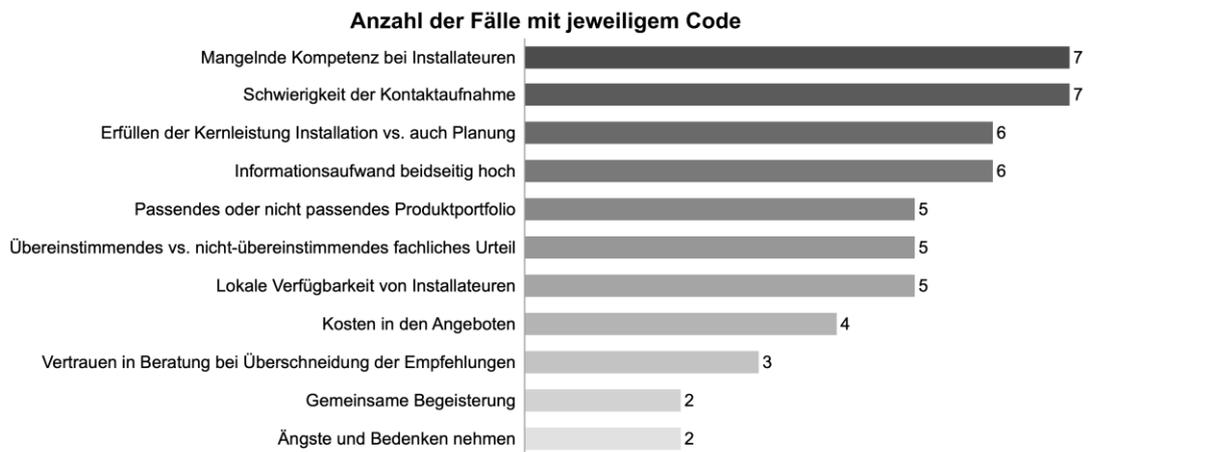
Sechs von 11 Teilnehmenden (55 %) beschreiben, dass ihnen in der Interaktion mit einem*einer Installateur*in die Unterscheidung wichtig war, ob diese*r ausschließlich die (Kern-)Leistung der Installation des ausgesuchten Heizsystems übernimmt nach vorheriger Auslegung durch die Teilnehmenden selbst oder durch eine*n dritte*n Expert*in (z.B. einem*einer Energieberater*in) oder ob die Leistung der Planung und Auslegung bei der*m Installateur*in mit angeboten wird. In dieser Gruppe gab es viele, die von dem*der Installateur*in nur die Installationsleistung erbracht haben wollten nach eigenen Spezifikationen. Dabei gilt es zu berücksichtigen, dass wir es hier mit einer Gruppe zu tun haben, die sehr viel Aufwand in die Recherche und oft auch Messung des eignen Hauses investiert haben (z.B. „Also ich plane selber, Ziel ist es aber, dass der Heizungsbauer alles komplett macht, also diesen Kollektor im Grundstück legt und die Heizung installiert.“ (Fall 5 Absatz 22)), was in anderen nicht 'early adopter' Gruppen oder bei Personen mit zeitlich restringierenden Faktoren nicht in dem Maße zu erwarten wäre. Aber auch hier bevorzugen zwei Teilnehmende es die Planung abzugeben, z.B. „Ich kann mit Strom recherchieren, ich kann Ihnen mit einer anderen Sache recherchieren, das kann ich auch alles bauen, das weiß ich auch genauer einzuschätzen, aber Heizung habe ich irgendwann gemerkt an einem Punkt: Hör zu, das kannst du nicht und das willst du auch nicht und da habe ich mir jemanden geholt.“ (Fall 12 Absatz 61). Ebenfalls 55 % der Teilnehmenden benennen, dass der Informationsaufwand während des Auswahlprozesses der sowohl von den Installateur*innen, als auch von den Hauseigentümer*innen geleistet werden muss, hoch ist. Ein wesentlicher Bestandteil der Interaktion bestehe in Informationsaustausch. Bei Fall 6 werden z.B. Unterlagen zum Haus an den Installateur geliefert und der Installateur informiert dann über Möglichkeiten eine Wärmepumpe einzubauen, auch wenn dies zusätzliche Informationen bezüglich etwaiger anderer Änderungen im Haus bedarf: „dann habe ich den angeschrieben und der hat mir dann gesagt, was er alles braucht an Unterlagen. Also Unterlagen habe ich zusammengesucht und dann auf dieser Basis hat der mir ein Angebot geschrieben.“ (Absatz 49) und „Nimmt sich jemand die Zeit, mein Heizungssystem wirklich so auszulegen, (...) dass es mit einer Wärmepumpe funktioniert. Auch das wäre ja eine Möglichkeit. Wenn es jetzt nicht geht, was muss man tun, damit es

geht? (Absatz 51). Viele der Teilnehmenden haben vorab ausführlich im Internet Informationen recherchiert (vgl. Abbildung 9 und Abbildung 11), sodass eine Person auch zu der Einschätzung kommt, dass viele der relevanten Informationen auch gar nicht kostendeckend von den Fachexpert*innen vermittelt werden können, z.B. „Das erzählt dir kein Heizungsbauer, das erzählt dir kein Solarinstallateur, kein Mensch hat die Zeit, dir so umfassende Informationen freiwillig aufbereitet und dazu noch kostenlos zu geben.“ (Absatz 84).

Fünf von 11 Teilnehmenden (45 %) berichten, dass während des Auswahlprozesses für sie wichtig war, dass der*die Installateur*in ein passendes Produktportfolio hat, (z.B. Fall 1 Absatz 66 „Es gibt natürlich auch da gute und schlechte Hersteller und es ist ja nicht so, dass jeder Installateur jeden Hersteller im Programm hat. Manche suchen sich halt einen billigen aus oder einen der aus der Nähe kommt oder wo er auch schon die Gaskessel davon verkauft hat und der hatte halt MARKE. Das ist eine relativ gute schwedische Marke und ja gut, es gibt auch andere gute, das will ich damit jetzt nicht sagen, aber er konnte mir halt auch darlegen, warum die gut sind. Und das hat sich mit dem gedeckt, was ich halt in meiner Vorbereitungszeit gelernt hatte.“), ein mit der eigenen Meinung übereinstimmendes fachliches Urteil (z.B. Fall 10 Absatz 92 „ich habe ja einen Wärmemengenzähler einbauen lassen, um mit realen Daten dann auch messen zu können: Wie ist der Volumenstrom in meinem Heizungsstrang, (...) welche Temperaturkurven fährt die Heizung denn tatsächlich. Also, um Fakten zu pflegen für eine Entscheidungsgrundlage und nicht den Aussagen eines Heizungsbauers einfach blind auf Treue und Glauben zu folgen.“) und ein*e Installateur*in lokal verfügbar ist, der sich mit der gewünschten (erneuerbaren) Technologie auskennt bzw. bereit ist, die Installation zu übernehmen (z.B. Fall 6 Absatz 49 „der zweite Installateur hat gesagt: "Mein Interesse ist nur begrenzt, wenn Sie schon ein Hausinstallateur haben, wieso sollte ich das mit Ihnen machen?" Dem habe ich dann gut zuredet und habe gesagt: "Ja, aber vielleicht, - den kann man ja auch ändern den Hausinstallateur. Und ich brauche halt jemanden, der mir eine Wärmepumpe auslegt." Ja, er selber könnte das auch nicht, aber er arbeitet halt mit diesem Energieberater zusammen.). Distanzen innerhalb derer nach Installateur*innen gesucht wurde variierte von 5 km bzw. innerhalb der Gemeindegrenze bis 50 km.

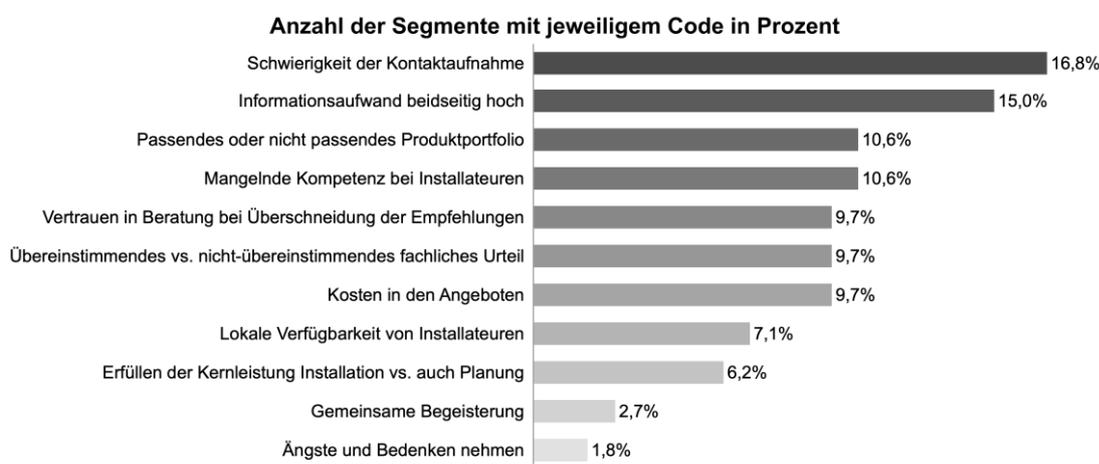
Für 4 oder weniger der 11 Personen waren in der Interaktion die Kosten in den Angeboten verschiedener Installateur*innen ausschlaggebend für die Wahl eines Angebots, das Vertrauen in die Beratung, welches besonders bei Überschneidungen der Empfehlungen zwischen verschiedenen Installateur*innen gesteigert wurde, eine gemeinsame Begeisterung für das Thema erneuerbare Heiztechnologien, die die Wahl positiv beeinflusst und das Nehmen von Ängsten und Bedenken im Gespräch wichtig, z.B. in Bezug auf Lärmbelastung oder Funktionsfähigkeit von Wärmepumpen auch in kalten Wintern.

Abbildung 14: Gewichtung der Kontingenzen des Auswahlverhaltens in der Interaktion mit Installateuren anhand der Auftretenshäufigkeit bei den 11 betrachteten Adopter*innen



Der zweite Indikator für die wichtigen Aspekte in der Interaktion mit den Installateur*innen (Abbildung 15) hat innerhalb der ersten vier Rangplätze ebenfalls die Kategorien Schwierigkeit der Kontaktaufnahme, wahrgenommene mangelnde Kompetenz und beidseitig hoher Informationsaufwand. Auffällig ist die Verschiebung der Kategorie Erfüllen der Kernleistung Installation vs. Planung (von Rangplatz 2 auf Rangplatz 6), die zwar von 6 verschiedenen Teilnehmenden angesprochen wird, auf die aber insgesamt nur 6,2 % der Codesegmente entfallen. Das liegt daran, dass die Personen es zwar jeweils in einem bzw. in einem Fall in zwei Codes thematisieren, im Vergleich zu anderen Kategorien ist die Häufigkeit der codierten Segmente für einen Fall pro Kategorie aber gering. Die Kategorie lokale Verfügbarkeit von Installateur*innen verschiebt sich in dieselbe Richtung von Rangplatz 3 auf Rangplatz 5. Eine Rangplatzverschiebung um 1 in die andere Richtung, also mehr kodierte Segmente aber weniger Nennungen von unterschiedlichen Personen, ist für die Kategorie Vertrauen in Beratung bei Übereinstimmung der Empfehlungen zu beobachten. Die Häufigung in den Segmenten kommt wesentlich dadurch zu Stande, dass für Fall 13 vier separate Segmente im selben Absatz (43) zum selben inhaltlichen Thema kodiert werden mussten.

Abbildung 15: Gewichtung der Kontingenzen des Auswahlverhaltens in der Interaktion mit Installateur*innen anhand der relativen Häufigkeit in allen kodierten Textsegmenten der Kategorie „operant contingencies choosing heating system – interlocking contingencies technicians“



Interpretation und Diskussion der Ergebnisse: Fragestellung 1

Unter Berücksichtigung beider Gewichtungsindikatoren individueller Kontingenzen sind für das Auswahlverhalten eines neuen Heizungssystems in einem Renovierungskontext insbesondere die Kompatibilität mit anderen Systemen im Haus, die einmaligen monetären Investitionskosten, die wiederholt auftretenden monetären Kosteneinsparungen im Vergleich zur Verwendung fossiler Brennstoffe und der wiederholt auftretende zeitliche Aufwand während des Betriebs relevant. Interessant ist, dass die wiederholten Kosten auf den Dimensionen Geld und Zeit und die einmaligen Kosten auf der Dimension Geld eine so hohe Gewichtung haben im Vergleich zu den einmaligen zeitlichen Kosten für den Planungsaufwand. Der Planungsaufwand in dieser 'early adopter' Gruppe war bei vielen mit etwa 2 Jahren hoch. Ohne das Vorhandensein einer Kontextrestriktion wie eines Ausfalls oder eines zeitnahen notwendigen Austausches des Heizsystems, scheinen lange Planungsphasen akzeptabel und werden von dieser technisch affinen Gruppe auch als interessant, teilweise als Hobby beschrieben. Für ein schnelles Voranbringen der Energietransformation im Wärmebereich des Haushaltssektors ist diese lange Planungsphase verbunden mit langen Wartezeiten auf eine Installation ein potentieller Ansatzpunkt zur Beschleunigung. Unter Berücksichtigung der Kategorien lokale Verfügbarkeit, Schwierigkeit der Kontaktaufnahme und wahrgenommene mangelnde Kompetenz in der Interaktion mit Installateur*innen, könnte es sein, dass im Falle eines schnell anstehenden Wechsels eines Heizsystems nicht genügend Installateur*innen vorhanden sind, die sich auch mit erneuerbaren Technologien auskennen. Ist das nicht gegeben, so wie es in der Kategorie mangelnde Kompetenz in der Interaktion mit Installateur*innen anklingt, kann eine einheitliche Beratung zwar für Vertrauen in die Beratung auf Seiten der Hausbesitzer*innen führen, aber eben auch zu oft zu Gunsten bereits bekannter Technologien ausfallen. Ein einfacher, lohnenswerter Zugang für Installateur*innen zu Weiterbildungsmaßnahmen im Bereich erneuerbarer Heiztechnologien wäre eine Möglichkeit dieser Herausforderung zu begegnen.

Der zeitliche Aufwand für den Betrieb erneuerbarer Heiztechnologien unterscheidet sich nicht wesentlich von öl- oder gasbasierten Heizsystemen. Exklusive der jährlichen Wartung beinhaltet der Betriebsaufwand Verhaltensweisen wie das Nachfüllen oder Lagern von Rohstoffen, das Leeren von Aschebehältern bei Pelletheizungen und ggf. weitere Reinigungsaufgaben. Je nach Technologie liegen diese schätzungsweise zwischen 0 Stunden pro Jahr und etwa 1 Stunde pro Monat. Obwohl diese zeitlichen Kosten gering sind, sind es im Gegensatz zum Planungsaufwand wiederholt und

relativ regelmäßig auftretende Verhaltenskosten, sodass man davon ausgehen kann, dass sie in der Bewertung einer Technologie stärker ins Gewicht fallen. Da die bisherigen Erfahrungen vieler Personen dahingehen, dass es einfach warm wird im Wohnbereich und man nichts für das Heizen oder an der Heizung tun muss, außer das Thermostat einzustellen, scheint es gerechtfertigt davon auszugehen, dass die „Default“ Erwartung an Aufwand 0 Stunden beträgt. Bei einer technologieoffenen Betrachtung und im Kontext innovativer, vielleicht auch noch nicht entwickelter Heizsysteme, scheint diese Kategorie trotz der geringen Differenzierung somit relevant für die Auswahlentscheidung.

Wir haben entschieden in der Analyse die Kontingenz Investitionskosten getrennt von der Kategorie monetäre Kostenersparnis durch Erhalt von Fördermitteln bei Wahl bestimmter Technologien zu kodieren. Obwohl dies ebenfalls einmalig auftretende Kosten sind und in der Evaluation durch die Teilnehmenden auch von den Investitionskosten abgezogen werden, spricht für die Aufrechterhaltung der Trennung dieser beiden Kategorien in der Analyse, dass der Erhalt der Förderung separat beantragt werden muss, erst später erfolgen kann als der Zeitpunkt zu dem die Investitionskosten anfallen und man im Nachhinein diese beiden Kategorien noch hätte zusammenführen können, womit die Bedeutung der Investitionskosten in der Gewichtung weiter steigen würde. Im Vergleich zu den hohen Investitionskosten, die teilweise „nur mit Idealismus“ (Fall 1 Absatz 44) oder Förderung akzeptabel scheinen, aber bekannt sind, sind die wiederholten Kostenersparnisse durch Verwendung nicht fossiler Brennstoffe mit Unsicherheit behaftet. Diese wiederholten Kostenersparnisse mit größerer Sicherheit zu belegen, z.B. durch eine längerfristig absehbare CO₂ – Bepreisung, könnte eine weitere Möglichkeit sein das Auswahlverhalten mehr in Richtung erneuerbarer Heiztechnologien zu beeinflussen.

Die Passung zu anderen Systemen scheint besonders im Kontext von Renovierungsmaßnahmen im Vergleich zum Neubau relevant. Da sich die verbalen Äußerungen sowohl auf Kompatibilität mit bereits installierten Technologien, vor allem PV-Anlagen beziehen, als auch auf zukünftige Anschaffungen, scheint ein Vorantreiben der Standardisierung auch zwischen verschiedenen Produktherstellern wünschenswert. Eine Standardisierung der Technologieschnittstellen könnte außerdem den positiven Effekt haben, sowohl den Aufwand für Eigenrecherche, wie auch für Informationsvermittlung seitens der Installateur*innen zu verringern. Somit könnte durch eine weiterführende Standardisierung auch die wichtige Kategorie Informationsaufwand beidseitig hoch in der Interaktion mit den Installateur*innen adressiert werden.

Ein Aspekt, der in der Gewichtung individueller Kontingenzen weniger oft vorkommt, aber insbesondere bei Wärmepumpen bisher viel diskutiert wird, ist der Aspekt des Lärmes. Lärm wurde wenig als individuelle Geräuschbelastung thematisiert. Auch als Gesprächspunkt zwischen Teilnehmenden und Installateur*innen in der Kategorie Ängste und Bedenken nehmen, die in der Gewichtung auch auf dem letzten Rangplatz liegt, findet das Thema Lärm wenig Gehör. Eine weitere bedeutende Kontingenz im Zusammenhang mit Lärm scheint jedoch der daraus resultierende potentielle soziale Konflikt mit Nachbarn zu sein, der in der Kategorie interlocking contingencies others kodiert wurde. Angesichts dieses Ergebnisses gewinnen erfahrbare, ästhetische und auditive Kontingenzen von innovativen Technologien in (ländlichen) Nachbarschaftskontexten und nicht nur auf Ausstellungen oder in städtischen Reallaboren an Bedeutung. Insbesondere bei hoch innovativen Technologien ist Modelllernen bei Nachbarn oft noch nicht möglich und es Bedarf eines Interesses und Aufwand um weiter entfernte Angebote aufzusuchen. Vielleicht wären Konzepte wie Wanderausstellungen erneuerbarer Energietechnologien eine denkbare Option.

Eine Kategorie, wie die der wahrgenommenen mangelnden Kompetenz auf Seiten der Installateur*innen, bedarf aufgrund der negativen Bewertung einer besonderen Betrachtung, zumal sie in der Gewichtung auf den oberen Rangplätzen ist. Wenn man sich die Merkmale der Teilnehmenden nochmal vor Augen führt, dann waren das eher 'early adopter', die sich viel und selbst informiert

haben im Internet und auf Foren, sodass man hier durchaus von einer ins Negative verzerrten Beurteilung ausgehen könnte, die ein relativ naiver Laie so nicht erleben würde. Allerdings enthalten die Beschreibungen der Teilnehmenden, wie an einigen der gewählten Textauszüge sichtbar wird, wiedergegebene Äußerungen von Installateur*innen, die nicht in der Lage sind erneuerbare Heiztechnologien auszulegen oder es ablehnen diese zu installieren. Es ist nicht zu erwarten, dass jede*r Installateur*in ein komplettes Produktportfolio aus erneuerbaren Heiztechnologien aufweist. Wenn es jedoch zu wenig qualifizierte Expert*innen gibt, was sich in der Kategorie Schwierigkeit der Kontaktaufnahme und lokale Verfügbarkeit andeutet, besteht im Bereich der Qualifizierung dennoch Verbesserungspotential. Diese Verantwortung muss jedoch nicht einseitig auf die Betriebe gelegt werden, welche zum Teil kleine Betriebe sind. Es gilt auch andere Möglichkeiten für eine qualifizierte Beratung in Betracht zu ziehen, seien es staatliche unabhängige Informationsportale oder die Energieberatung.

Welche Kontingenzen müssten sich ändern, um das Kaufen einer erneuerbaren, innovativen Heiztechnologie wahrscheinlicher zu machen? (Fragestellung 2)

Die Hemmnisse und Fördernisse die unsere Teilnehmenden beschreiben scheinen besonders relevant, weil im Vergleich zum Neubau mit etwa 47 % Wärmepumpen und Biomasse Nutzung bei Renovierungen der Anteil mit 8 % deutlich geringer lag in 2020 (Gebäudeforum klimaneutral, 2022).

Die Analyse der Verbesserungsmöglichkeiten in Bezug auf Fördernisse und Hemmnisse für den Kauf erneuerbarer, innovativer Heiztechnologien erfolgte anhand der kodierten Codes in der Kategorie *changes for buying innovative, renewable technologies*. Die kodierten Textsegmente wurden mit Hilfe des Analyse Tools „Summary-Grid“ pro Fall zusammengefasst, in einer „Summary-Tabelle“ exportiert, zu neuen Subcodekategorien abstrahiert, im Kodiersystem ergänzt und kodiert. In Tabelle 3 sind die als Verbesserungsmöglichkeiten formulierten Äußerungen der Teilnehmenden zusammengefasst. Die Sortierung erfolgte anhand der Häufigkeit der kodierten Textsegmente.

Tabelle 3: Von Teilnehmenden benannte Fördernisse für mehr innovative, regenerative Heiztechnologien sortiert nach Häufigkeit

Abstrahierte Kategorienbezeichnungen	Fall 1	Fall 2	Fall 3	Fall 4	Fall 5	Fall 6	Fall 7	Fall 10	Fall 11	Fall 12	Fall 13	Total
Preise von regenerativen Systemen senken	2	1	0	0	0	9	0	0	0	1	0	13
Haus-Technologie-Passung soll im Fokus stehen	0	0	0	0	0	0	1	9	0	2	0	12
Mangelnde Vertrauenswürdigkeit beteiligter Akteure abbauen	3	0	0	5	2	0	0	0	1	0	0	11
Aktive Maßnahmen durch die Politik notwendig	4	1	0	0	0	1	0	4	0	0	1	11
Informationslage verbessern	1	1	0	1	0	0	0	4	0	2	2	11
Mehr Aufklärung über verfügbare innovative Systeme	0	1	0	1	5	1	2	0	0	0	1	11
Interesse an erneuerbarem Heizen fördern	0	0	0	0	1	1	1	6	0	0	1	10
Positivbeispiele verbreiten	0	0	0	0	0	10	0	0	0	0	0	10
Qualität der Beratung verbessern	0	0	0	3	1	0	1	1	0	3	1	10
Unabhängige, kostenfreie Beratungsstellen	0	0	0	0	1	0	0	0	3	0	4	8
Fachkräftemangel und hohe Auslastung abbauen	0	4	0	0	0	1	1	0	0	1	0	7
Installateure müssen aktiv werden	0	3	0	0	1	0	0	2	0	0	0	6
Selbsteinbau fördern	0	5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	5
Finanzielle Kosten einführen für klassische Systeme	2	0	0	0	0	3	0	0	0	0	0	5
Traditionen abbauen	0	0	0	0	0	1	1	0	2	0	1	5
Fehlerhafte Beratung bestrafen	0	0	0	0	0	0	0	0	0	5	0	5
Lobbyarbeit entgegenwirken	1	0	0	0	0	0	0	0	0	3	0	4
Standardisierung der Angebotsstruktur	0	0	0	2	0	1	0	1	0	0	0	4
Qualität der Leistung verbessern	0	0	0	2	0	0	0	1	0	1	0	4
Klare politische Kommunikation notwendig	1	0	0	0	0	1	0	0	0	0	2	4
Alte Systeme in den Hintergrund rücken	0	0	0	0	0	3	0	0	0	0	0	3
Schulungen für Installateure über neue innovative Systeme	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	2	3
Förderrichtlinien überarbeiten	0	2	0	0	0	0	1	0	0	0	0	3
Bewusstsein schaffen über Zusammenh. von Heizen und Co2-Ausstoß	1	0	0	0	0	1	0	0	0	0	1	3
Sorgen nehmen, die mit neuen Systemen aufkommen	1	0	0	0	0	2	0	0	0	0	0	3
Netzwerkstreben unter Nachfragern fördern	0	0	0	0	0	2	0	0	0	0	0	2
Installateure sollen Referenzen vorweisen können	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	1
SUMME	16	18	0	14	12	38	8	28	6	18	16	174

Interpretation und Diskussion der Ergebnisse: Fragestellung 2

In Übereinstimmung mit den identifizierten Kontingenzen des Auswahlverhaltens in Fragestellung 1 bezieht sich die Mehrzahl der vorgeschlagenen Fördernisse auf eben diese Kontingenzen.

Insgesamt 10 der 27 abstrahierten Kategorien beziehen sich direkt auf Installateur*innen, was erneut deren Wichtigkeit als Akteur bei der Gestaltung der Transformation des Haushaltswärmesektors verdeutlicht. Eine vorher nicht identifiziertes Fördernis Traditionen abbauen beschreibt die Möglichkeit die Anpassungsfähigkeit der Installateur*innen im Hinblick auf neue Heiztechnologien zu fördern. Aus Sicht der Teilnehmenden ist ein wahrgenommenes Hemmnis auf Seiten der Installateur*innen das noch günstigere Kosten-Nutzen-Verhältnis beim Beharren auf alten bzw. bekannten Heiztechnologien, z.B. „die können Ihr Geld auch noch einfacher verdienen, indem die einfach das tun, was sie schon immer gemacht haben.“ (Fall 6, Absatz 49). Eine bisher ebenfalls nicht so konkret benannte Idee ist die Angebotsstruktur zu vereinheitlichen, um einen Vergleich verschiedener Angebote zu erleichtern.

Drüber hinaus wird häufig die Politik als wesentlicher Akteur bei der Umsetzung von förderlichen Bedingungen benannt. So werden von der Politik aktivere Maßnahmen zur Unterstützung gewünscht. Obwohl diese wenig konkret werden, sind Beispiele verbesserte Rahmenbedingungen für innovative Systeme, ordnungspolitische Regelungen, mehr finanzielle Unterstützung, stärkerer Fokus auf CO₂- Neutralität und Anreize für die Anbieter erneuerbarer Heiztechnologien. In der Wahrnehmung einiger Fälle bedarf es auch einer klareren politischen Kommunikation. So könnten bspw. politische Signale, die über monetäre Fördermaßnahmen hinausgehen, wie z.B. das Festschreiben von Emissionszielen und insbesondere deren Kommunikation durch Informations- oder Werbekampagnen ein Fördernis sein.

2.2.4 Integration der Qualitativen Interviews und des DCE

Aus den Erkenntnissen der Pilotstudie und der qualitativen Leitfadenterviews wurden zwei neue Attribute in das DCE übernommen. Zum einen wurde der Betriebsaufwand des jeweiligen Heizsystems als zusätzliches Attribut einbezogen. Einzelne Heiztechnologien sind mit deutlich höherem Aufwand im Betrieb verbunden und erfordern beispielsweise die Nachfüllung von Brennstoffen sowie regelmäßige Reinigung. Des Weiteren wurde das Vorhandensein politischer Fördersignale für bestimmte Heiztechnologien mit einbezogen. Neben rein finanzieller Besserstellung können politische Fördermaßnahmen von Verbrauchern auch als Signale für die Zukunftsfähigkeit eines Heizsystems betrachtet werden. Dieser Tatsache sollte durch das zusätzliche Attribut Rechnung getragen werden und die Stärke des Effektes in unterschiedlichen soziodemographischen Gruppen weiter untersucht werden.

Neben den beiden neuen Attributen wurde das Attribut der Hauptinformationsquelle aus der Pilotstudie basierend auf den Ergebnissen der qualitativen Befragung abgeändert. In der neuen Form wurde vor allem darauf fokussiert, inwiefern Informationen zur Planung und Umsetzung eines neuen Heizsystems direkt durch den*die Fachinstallateur*in verfügbar sind, oder ob diese Informationen größerer Eigenrecherche bedürfen. Diese Änderung berücksichtigt die Erkenntnis, dass lokale Fachinstallateur*innen vielfach eine entscheidende Rolle für die Wahl des Heizsystems spielen können.

Letztendlich wurden die folgenden Attribute in die Alternativen des DCE übernommen:

1. Investitionskosten

Die Investitionskosten spiegeln den Gesamtbetrag Ihrer Investition wider. Mögliche Fördermittel sind dabei bereits berücksichtigt.

2. Jährliche Betriebskosten

Die Betriebskosten enthalten die jährlichen Betriebs- und Wartungskosten (inklusive Brennstoffkosten und Kosten durch die CO₂-Bepreisung im Rahmen des Brennstoffemissionshandelsgesetzes).

3. CO₂-Emissionsminderung

Mit der CO₂-Emissionsminderung wird angegeben, inwieweit sich Ihre CO₂-Emissionen im Vergleich zum Heizen mit Erdgas reduzieren würden. Eine höhere Einsparung zeigt also die höhere Klimafreundlichkeit einer Technologie.

4. Politisches Fördersignal

Durch ein politisches Fördersignal wird angegeben, ob politische Unterstützung für diese Heiztechnologie, bspw. in Form eines Förderprogrammes, existiert.

5. Informationsbezug

Der Informationsbezug gibt an, wie einfach die Informationen zur Planung und Umsetzung der Installation eines gewissen Heizsystems von Fachinstallateur*innen bezogen werden können. Während für etablierte Technologien viele Informationen durch Fachinstallateur*innen bereitgestellt werden können, erfordern weniger etablierte und innovative Heizungstechnologien mehr Eigenrecherche.

6. Zusätzlicher Betriebsaufwand

Der zusätzliche Betriebsaufwand gibt an, welcher Zeitaufwand für eine Technologie, zusätzlich zur jährlichen Wartung, anfällt. Dieser zusätzliche Aufwand besteht beispielsweise im Nachfüllen von Brennstoffen, Leeren von Aschebehältern, oder weiteren Reinigungsaufgaben.

Analog zur Pilotstudie, wurden für die Wahl der die Ausprägungen der quantitativ messbaren Attribute Investitionskosten, jährliche Betriebskosten, CO₂-Emissionsminderung und zusätzlicher Betriebsaufwand die technologischen Eigenschaften der in Deutschland existenten Heizungstechnologien berücksichtigt. Die konkreten Zahlen basieren zum einen auf Technologiesteckbriefen, die zu Beginn des Projektes vom Projektpartner IREES bereitgestellt wurden, und eigenen Recherchen. Die Ausprägung für das Attribut Informationsbezug wurde gemeinsam mit dem Projektpartner TU Braunschweig basierend auf den Ergebnissen der qualitativen Umfrage erarbeitet. Die vollständigen Ausprägungen sind in Tabelle 4 abgebildet.

Tabelle 4: Wahl der Attribute und Ausprägungen für das DCE

Attribut	Ausprägung
1. Investitionskosten	[8 000 EUR; 11 000 EUR; 14 000 EUR; 17 000 EUR]
2. Jährliche Betriebskosten	[500 EUR/Jahr; 800 EUR/Jahr; 1 100 EUR/Jahr; 1 400 EUR/Jahr]
3. CO ₂ -Emissions-reduzierung	[0%; 25%; 50%; 75%]
4. Politisches Fördersignal	[Es gibt ein Förderprogramm; Es gibt kein Förderprogramm]
5. Zusätzlicher Betriebsaufwand	[0 Stunde (Kein zusätzlicher Betriebsaufwand); 1 Stunde pro Halbjahr; 1 Stunde pro Vierteljahr; 1 Stunde pro Monat]
6. Informationsquelle	[(1) Informationsbezug hauptsächlich über Fachinstallateur*innen, kaum Eigenrecherche notwendig; (2) Informationsbezug eher über Fachinstallateur*innen und teilweise Eigenrecherche notwendig;

Attribut	Ausprägung
	(3) Informationsbezug nur teilweise Fachinstallateur*innen und eher Eigenrecherche notwendig;
	(4) Informationsbezug kaum über Fachinstallateur*in, hauptsächlich Eigenrecherche notwendig]

Für die Durchführung des DCE musste ein angemessenes und effizientes Design der Choice Sets gewählt werden. Insgesamt werden orthogonale und balancierte Designs für eine möglichst hohe Effizienz angestrebt. Daher sind bei allen Attributen vier bzw. in einem Fall zwei Ausprägungslevel gewählt worden. Die Aufteilung der Ausprägungen auf die Choice Sets sowie die Anzahl der Choice Sets wurde mit Hilfe des Statistikprogramms jmp bestimmt. Das vollständige Design ist in Tabelle 5 dargestellt. Insgesamt wurden 16 Choice Sets definiert, die in zwei Umfrageteile unterteilt wurden. Ein Umfrage-Teilnehmender hat dabei jeweils nur einen der Umfrageteile bekommen, um so nur acht statt 16 Antworten geben zu müssen. Das Design hat sowohl eine 100 %-ige A-Effizienz – bestimmt durch das arithmetische Mittel der Eigenwerte – als auch eine 100 %-ige D-Effizienz – eine Funktion der geometrischen Mittel der Eigenwerte (Huber & Zwerina, 1996).

Tabelle 5: DCE Choice Set Design (*siehe Definition Tabelle 4)

Choice-Satz	Umfrageteil	Investitionskosten [EUR]		Jährliche Betriebskosten [EUR/Jahr]		CO ₂ -Emissionsminderung [%]		Politisches Signal		Zusätzlicher Betriebsaufwand [Std/Jahr]		Informationsquelle*	
		1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2
<i>Auswahlmöglichkeit</i>													
1	1	14000	11000	1400	1100	75	0	Nein	Ja	4	2	(1)	(1)
2	1	8000	17000	1100	800	75	0	Ja	Nein	4	2	(4)	(4)
3	1	11000	14000	1100	800	50	0	Nein	Ja	0	12	(1)	(1)
4	1	11000	8000	1400	500	25	50	Nein	Ja	4	12	(2)	(2)
5	1	14000	11000	1100	500	25	0	Nein	Ja	2	4	(4)	(4)
6	1	17000	11000	1400	800	75	0	Ja	Nein	2	0	(2)	(2)
7	1	8000	14000	800	1400	25	0	Nein	Ja	4	0	(2)	(2)
8	1	11000	8000	1100	1400	75	50	Ja	Nein	4	0	(1)	(1)
9	2	8000	14000	800	1100	75	50	Ja	Nein	0	12	(3)	(3)
10	2	14000	11000	500	1400	25	75	Ja	Nein	4	12	(3)	(3)
11	2	17000	14000	1400	800	50	75	Ja	Nein	4	12	(4)	(4)
12	2	8000	17000	500	800	0	50	Nein	Ja	2	12	(1)	(1)
13	2	8000	11000	1100	500	0	25	Nein	Ja	4	0	(3)	(3)
14	2	17000	8000	500	1400	75	25	Nein	Ja	0	12	(4)	(4)
15	2	11000	17000	500	1100	50	0	Nein	Ja	2	0	(3)	(3)
16	2	14000	17000	800	500	50	25	Ja	Nein	2	12	(2)	(2)

Zur methodischen Vorgehensweise der Schnittstelle zwischen qualitativer (Leitfadeninterviews) und quantitativer (DCE) Forschung ist eine gemeinsame Veröffentlichung zwischen RWTH FCN-ESE und TU Braunschweig geplant.

2.2.5 Durchführung, Auswertung und Ergebnisse der empirischen Erhebung des DCE

Für die Durchführung der Umfrage wurde diese als Fragebogen auf einem lehrstuhleigenen Webserver aufgesetzt und mit einer Datenbank zur Erfassung der Ergebnisse gekoppelt. Im Gegensatz zu den qualitativen Leitfadeninterviews, welche gezielt die Perspektive von potentiellen Adopter*innen abbilden sollte, wurde für die quantitative Umfrage ein deutlich breiterer Kreis an Teilnehmenden gewählt, die jeweils zur Hälfte aus Mietern und zur Hälfte aus Eigentümern von Wohnraum bestanden. Hinsichtlich der Kriterien Geschlecht, regionale Verteilung (auf Bundeslandebene) und Haushaltsnettoeinkommen sind die Teilnehmenden dabei repräsentativ zur deutschen Bevölkerung (siehe Tabelle 6) gewählt. Grund für diese Entscheidung war, dass in der Umfrage nicht nur die Präferenzen tatsächlicher Entscheidungsträger erfasst werden sollten, sondern auch die anderen Gruppen wie beispielsweise Wohnungsmieter, oder jüngere Menschen, die typischerweise nur geringen Einfluss auf die jeweils eingesetzten Heiztechnologien haben. Ziel dieser Vorgehensweise war es, Differenzen in den Präferenzen unterschiedlicher soziodemographischer Gruppen, auch in Abhängigkeit von den jeweiligen Wohneigentumsverhältnissen abbilden zu können.

Für die Durchführung der Umfrage wurde anhand der Zahl der Attribute im DCE eine notwendige Zahl von Teilnehmenden von $n = 2000$ identifiziert und Angebote von mehreren Panel-Anbietern für Online-Umfragen eingeholt.

Die tatsächliche Durchführung der Online-Umfrage fand im Februar 2022 in Zusammenarbeit mit dem Panel-Anbieter Bilendi & respondi statt. 2200 Teilnehmende nahmen dabei an der jeweils ca. 5-10-minütigen Befragung teil. Am 09.02.2022 konnte die Umfrage mit der Übergabe der quotenrelevanten, von Bilendi & respondi erfassten Daten abgeschlossen werden. Mittels erfasster Identifikationsnummer konnten die von Bilendi & respondi erfassten Daten mit den in der lehrstuhleigenen Datenbank eingegangenen zugeordnet werden.

Tabelle 6: Soziodemographische Faktoren der Umfrageteilnehmenden

Soziodemographische Faktoren (N = 2052)			
Geschlecht		Bildungshintergrund	
männlich	50,44%	Kein Schulabschluss	0,29%
Weiblich	49,46%	Hauptschule	8,14%
Divers	0,10%	Realschule	23,25%
		Fachhochschulreife	6,34%
Altersklassen		Abitur	14,86%
18-29	19,30%	FMTBF*	15,25%
30-39	17,84%	Fachhochschulabschluss	10,53%
40-49	18,37%	Universitätsabschluss	19,35%
50-59	24,85%	Promotion	1,02%
60-69	19,64%	Sonstiger Bildungsabschluss	0,49%
Nettohaushaltseinkommen		Beschäftigung	
Weniger als 900 EUR/Monat	4,97%	Vollzeit	55,36%
900 - 1.500 EUR/Monat	9,55%	Teilzeit	13,99%
1.500 - 2.000 EUR/Monat	8,48%	Azubi	2,58%
2.000 - 2.600 EUR/Monat	14,91%	FSJ/Wehrdienst	0,19%
2.600 - 3.600 EUR/Monat	18,81%	Geringfügig	3,41%
3.600 - 5.000 EUR/Monat	29,14%	Sonstiges	21,00%
Mehr als 5.000 EUR/Monat	14,13%		

* Fach-, Meister-, Technikerschule, Berufs- oder Fachakademie

Tabelle 7: Wohnsituation der Umfrageteilnehmenden

Wohnsituation (N = 2052)			
Haushaltsgröße		Heiztechnologie	
Einpersonenhaushalt	17,10%	Gas	49,51%
Zweipersonenhaushalt	40,69%	Öl	16,52%
3-5 Personen-Haushalt	39,33%	Fernwärme	13,30%
Mehr als 5 Personen	0,83%	Wärmepumpe	6,63%
		Holzpellets	4,00%
Wohnfläche		Sonstiges	3,41%
1-50 m ²	9,52%	Weiß nicht	5,26%
51-100 m ²	42,96%		
101-150 m ²	29,91%	Wohnsituation	
151-200 m ²	12,05%	Eigentümer	51,90%
mehr als 200 m ²	5,41%	Mieter	48,10%

Für die Analyse der Ergebnisse eines DCE können unterschiedliche statistische Methoden gewählt werden. Grundsätzlich dienen diese dazu, die sogenannten „stated preferences“ der Teilnehmenden zu ermitteln. Dabei werden aus den hypothetischen Entscheidungen, mit welchen die Teilnehmenden im Rahmen des DCE konfrontiert wurden, Nutzerpräferenzen abgeleitet. Diese Präferenzen spiegeln dabei die relative Wichtigkeit der untersuchten Attribute wieder und sind stets vom konkreten Umfragedesign abhängig. Sie lassen Rückschlüsse über die folgenden zwei Fragen zu:

- Ist der Einfluss einer Attributsausprägung auf die Wahrscheinlichkeit zur Entscheidung für eine bestimmte Alternative positiv oder negativ (Erhöhen oder senken höhere Betriebskosten c.p. die Wahrscheinlichkeit zur Entscheidung für ein Heizsystem)?
- Wie groß ist der Einfluss eines Attributes im Verhältnis zu einem anderen Attribut (Wie stark erhöht eine Reduktion der Betriebskosten die Wahrscheinlichkeit zur Entscheidung für ein Heizsystem, im Vergleich zur Reduktion der Investitionskosten)?

Die konkrete Auswahl des statistischen Modells für die Datenauswertung hängt von mehreren Kriterien ab². Im vorliegenden Fall wurde nach der Analyse und dem Testen unterschiedlicher Methoden ein Mixed Logit (auch Random Parameter Logit) Modell ausgewählt. Der Vorteil dieses Ansatzes

² Hauber et al. (2016) bieten einen guten Überblick zu den unterschiedlichen Vor- und Nachteilen einzelner Methoden.

gegenüber dem klassischen Logit Modell ist, dass die Heterogenität der Präferenzen innerhalb der Teilnehmenden berücksichtigt werden kann. Neben der Ermittlung durchschnittlicher Präferenzgewichte kann mithilfe dieses Modells auch eine Aussage zur Verteilung dieser innerhalb der Teilnehmenden geschätzt werden³.

Tabelle 8: Ergebnisse des Discrete Choice Experimentes für die gesamte Stichprobe

Attribut	β	p-Wert	Zahlungsbereitschaft ⁴	Interpretation
CO₂-Emissionsreduktion	0,008	0,0000	60	EUR Zahlungsbereitschaft für ein Prozent CO ₂ -Reduktion im Vergleich zum Heizen mit Erdgas ⁵
Eigenrecherche	0,169	0,0000	-1271	EUR Zahlungsbereitschaft im Vergleich zu Informationsbezug vollständig durch Fachinstallateur*in
Eigenrecherche-Fachinstallateur*in	0,263	0,0000	-1977	
Fachinstallateur*in-Eigenrecherche	0,143	0,0000	-1075	
Investitionskosten	0,133	0,0000		
Betriebskosten	1,856	0,0000	14	EUR Zahlungsbereitschaft für Senkung der jährlichen Betriebskosten um einen EUR
Politiksignal	0,536	0,0000	4030	EUR Zahlungsbereitschaft für positives politisches Fördersignal
Betriebsaufwand	0,062	0,0000	466	EUR Zahlungsbereitschaft für Senkung des jährlichen zusätzlichen Betriebsaufwands um eine Stunde

Tabelle 8 zeigt die Ergebnisse der statistischen Auswertung des Discrete Choice Experimentes für die gesamte Stichprobe. Der Gewichtungparameter β gibt die relative Wichtigkeit eines einzelnen Attributes für die Entscheidungssituation, im Verhältnis zu den anderen Attributen an. Eine Interpretation des absoluten Wertes von β ist hingegen nicht möglich und die Interpretation der Relationen zwischen den einzelnen Attributen hängt von den jeweiligen Einheiten ab. Für eine einfachere Interpretierbarkeit sowie für die Übergabe in die Energiesystemmodelle, wurden die Ergebnisse deshalb in Zahlungsbereitschaften umgerechnet wie in Formel (1) angegeben. Für diese Berechnung wird die relative Wichtigkeit β_a eines Attributes a in Verhältnis zur relativen Wichtigkeit

³ Für eine detaillierte mathematische Herleitung des Mixed Logit Modells, siehe Revelt und Train (1998).

⁴ Teilweise wurden die Vorzeichen der angegebenen Zahlungsbereitschaften geändert, um eine leichtere Interpretierbarkeit der Ergebnisse zu ermöglichen.

⁵ Auch beim Heizen mit Erdgas gibt es deutliche Unterschiede in den CO₂-Emissionen, bspw. zwischen einem Niedrigtemperaturkessel und einem Brennwertkessel. Im Umfragedesign wurde diese Differenzierung aus Gründen der Komplexitätsreduktion für die Teilnehmenden nicht vorgenommen.

β_c eines anderen Attributes gesetzt, welches mit einer monetären Einheit in die Regression eingegangen ist. Das entsprechende Verhältnis entspricht dem Verhältnis der Grenznutzen und damit der Grenzrate der Substitution beider Attribute. Für die Berechnungen der vorliegenden Zahlungsbereitschaften wurden die Investitionskosten als monetäres Attribut c verwendet. Dies führt dazu, dass die jeweilige Zahlungsbereitschaft WTP_a für Attribut a ebenfalls als monetärer Wert interpretiert werden kann.

$$WTP_a = - \frac{\frac{\partial U}{\partial a}}{\frac{\partial U}{\partial c}} = - \frac{\beta_a}{\beta_c} \quad (1)$$

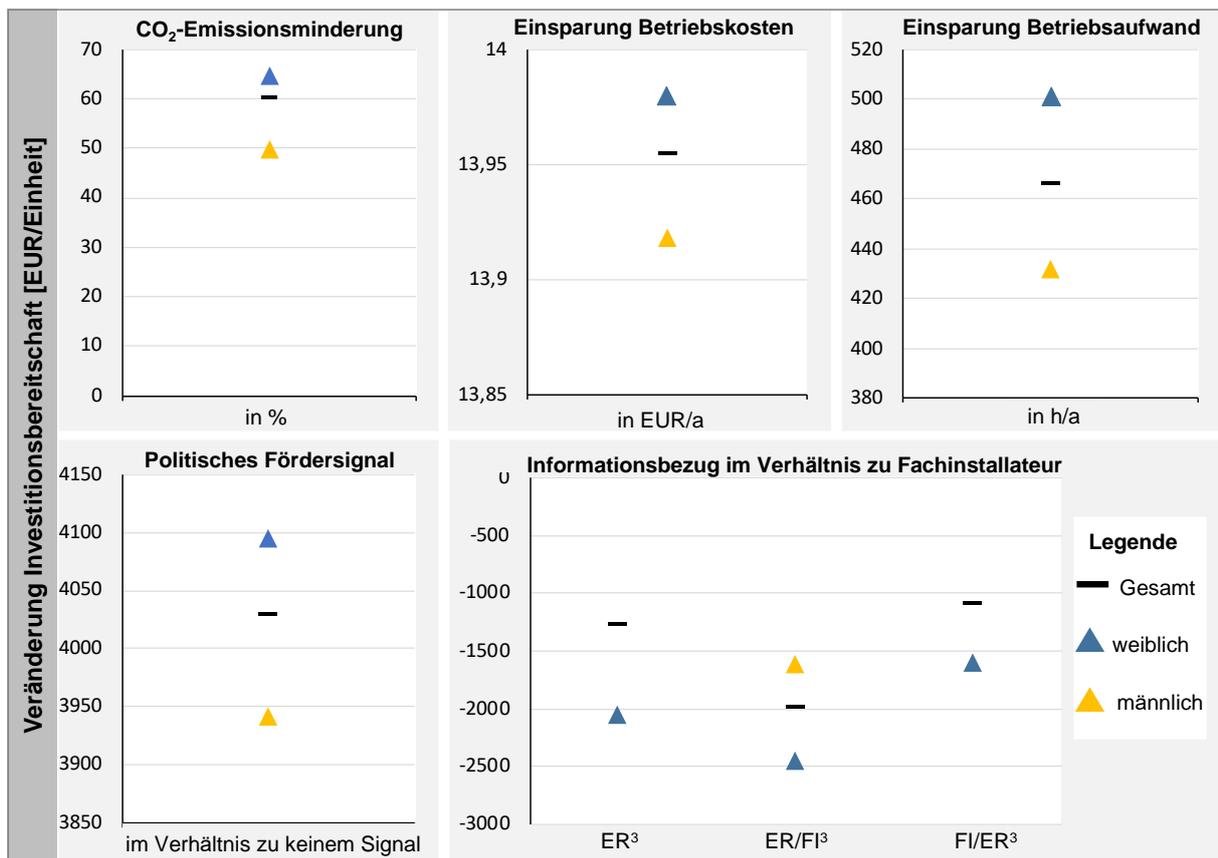
In den Ergebnissen für die gesamte Stichprobe zeigt sich eine positive Zahlungsbereitschaft für die Reduktion von CO₂-Emissionen, zusätzlichem Betriebsaufwand, Einsparungen bei den Betriebskosten und bei positiven Politiksignalen. Beispielsweise sind die Teilnehmenden durchschnittlich bereit zusätzliche Investitionskosten von ca. 60 Euro zu zahlen, um eine CO₂-Emissionsreduktion von 1% im Vergleich zum Heizen mit Erdgas zu erreichen. Für die Reduktion der jährlichen Betriebskosten um einen Euro besteht eine durchschnittliche Zahlungsbereitschaft von rund 14 Euro höheren Investitionskosten. Damit sind im Vergleich zur Pilotstudie die Zahlungsbereitschaften sowohl für die Emissionsreduktion als auch für die Einsparung jährlicher Betriebskosten gesunken. Ob dies an den veränderten Attributen, den angepassten Ausprägungen der in beiden Studien vorhandenen Attribute oder an tatsächlich veränderten Präferenzen beispielsweise in Folge einer anderen wirtschaftlichen Lage zu den Zeitpunkten der Umfragedurchführung liegt, lässt sich nicht eindeutig identifizieren.

Negative Zahlungsbereitschaften ergeben sich für die ausgewiesenen Attributsausprägungen des Informationsbezuges. Diese ist so zu interpretieren, dass Teilnehmende im Durchschnitt die enge Beratung durch eine*n Fachinstallateur*in bevorzugen und dass die Zahlungsbereitschaft für Alternativen, bei denen ein höherer Anteil an Eigenrecherche erforderlich ist, sinkt. Interessanterweise ist der Zusammenhang hier allerdings nicht linear. Stattdessen wird der Informationsbezug ausschließlich durch Eigenrecherche mit einer höheren Zahlungsbereitschaft verbunden als die Situation, in welcher Fachinstallateur*innen in einem geringen Maß für den Informationsbezug zur Verfügung stehen. Eine mögliche Erklärung für diese Beobachtung ist, dass die Ergebnisse hier durch die Heterogenität der Präferenzen getrieben werden. Während ein Großteil der Stichprobe grundsätzlich gern ein hohes Maß an Informationen über Fachinstallateur*innen beziehen möchte, könnte eine kleine Gruppe an sogenannten 'early adopter' dieses Bild verzerren, indem sie eine sehr hohe Präferenz für reine Eigenrecherche aufweisen. Eine alternative Erklärung der Beobachtung wäre jedoch auch, dass die Zwischenabstufung zwischen den beiden extremen Attributsausprägungen („Informationsbezug findet komplett über Fachinstallateur*innen statt“ und „Informationsbezug findet ausschließlich über Eigenrecherche statt“) für die Teilnehmenden des DCE nur schwer zu interpretieren waren und daher keine klaren Ergebnisse zeigten. Eine genauere Analyse des Attributes Informationsbezug kann leider keine dieser beiden Erklärungen bestätigen oder ausschließen. Zwar zeigen Teilnehmende mit soziodemographischen Profilen, die klassischerweise in den Bereich der 'early adopter' eingeordnet werden tatsächlich eine starke Präferenz für Eigenrecherche, allerdings ist der Anteil dieser Gruppe an der Gesamtstichprobe nicht groß genug, um hier eine abschließende Aussage treffen zu können. Analysen anderer soziodemographischer Gruppen zeigen

hier keine klaren Trends und verstärken somit den Eindruck, dass die Interpretation der Zwischenausprägungen für die Teilnehmenden nicht eindeutig genug war.

Im Folgenden werden beispielhaft weitere Ergebnisse der Erhebung anhand ausgewählter soziodemographischer Kriterien vorgestellt.

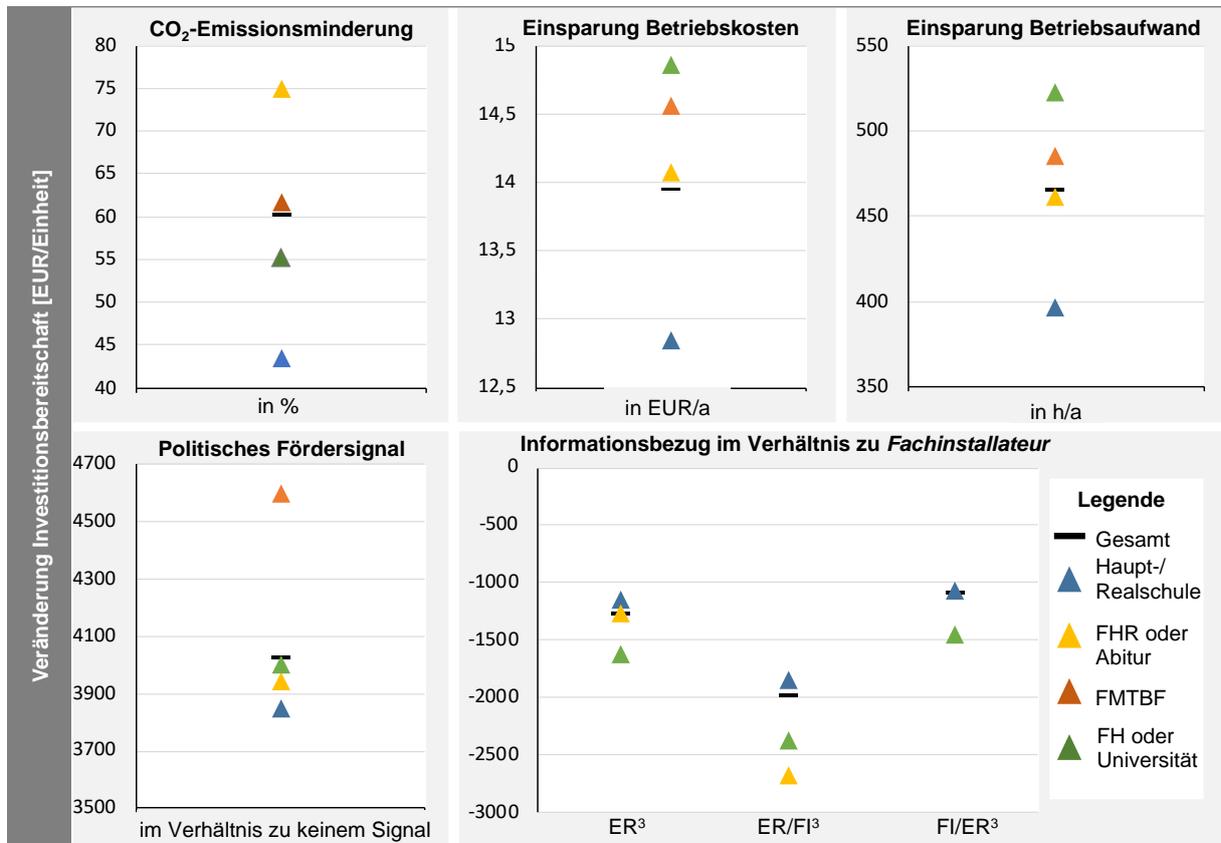
Abbildung 16: Zahlungsbereitschaften nach Geschlecht [EUR Investitionskosten/Einheit]



¹ Im Verhältnis zum Heizen mit Erdgas, ² 0, 2, 4 oder 12 Stunden/Jahr, ³ ER-reine Eigenrecherche; ER/FI-Eigenrecherche, teils über Fachinstallateur*innen; FI/ER Informationsbezug über Fachinstallateur*in, teilweise Eigenrecherche

Differenziert man nach dem Geschlecht der Teilnehmenden, so zeigen Frauen im Vergleich zu Männern eine höhere Zahlungsbereitschaft für Heizsysteme mit niedrigeren CO₂-Emissionen sowie für die Vermeidung von zusätzlichem Betriebsaufwand. Männer haben im Vergleich zu Frauen eine leicht erhöhte Zahlungsbereitschaft für Heizsysteme, die einen höheren Anteil an Eigenrecherche erfordern.

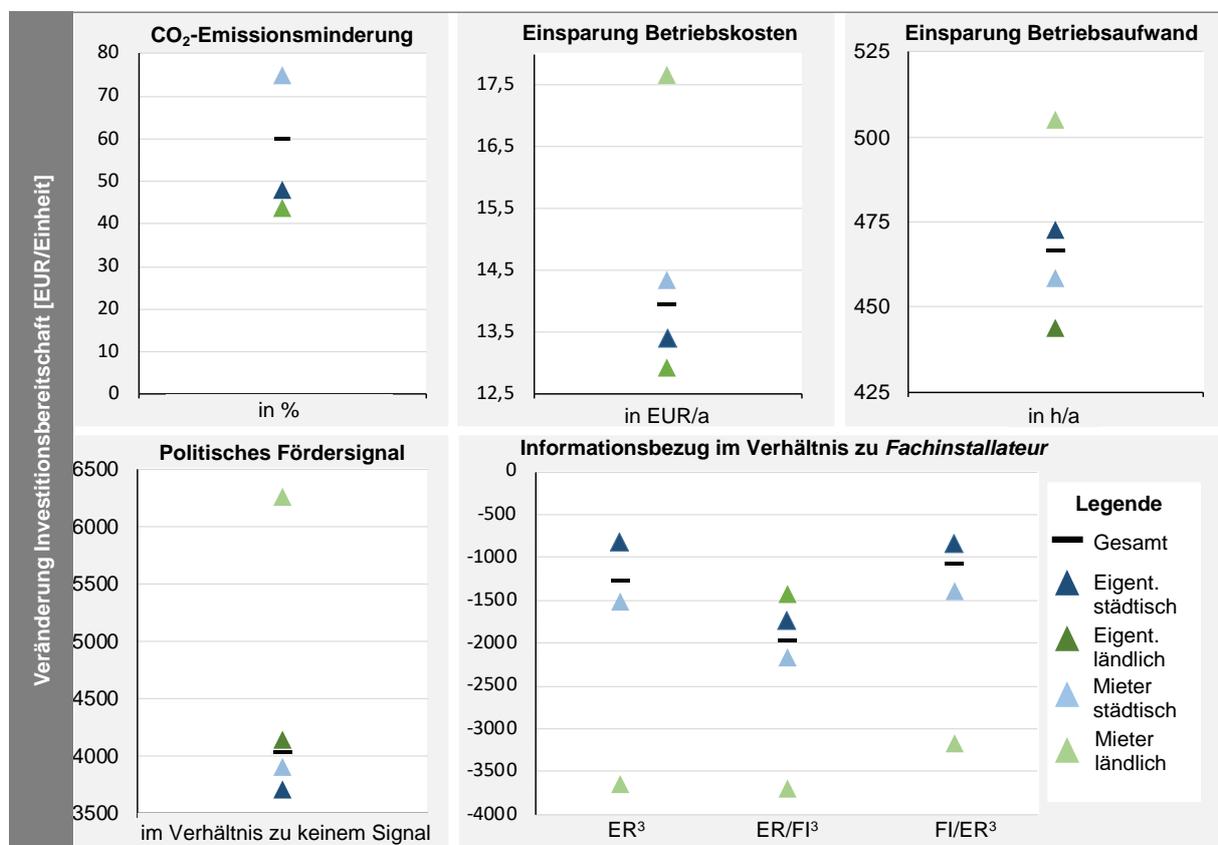
Abbildung 17: Zahlungsbereitschaften nach Bildungsgrad [EUR Investitionskosten/Einheit]



¹ Im Verhältnis zum Heizen mit Erdgas, ² 0, 2, 4 oder 12 Stunden/Jahr, ³ ER-reine Eigenrecherche; ER/FI-Eigenrecherche, teils über Fachinstallateur*in; FI/ER Informationsbezug über Fachinstallateur*in, teilweise Eigenrecherche; *Fach-, Meister-, Technikerschule, Berufs- oder Fachakademie

Die Differenzierung nach dem Bildungsgrad zeigt größere Zahlungsbereitschaften für die Attribute CO₂-Emissionsminderung sowie Einsparung von Betriebskosten und –aufwand für Teilnehmende mit höheren Bildungsabschlüssen. Politische Fördersignale erhöhen die Zahlungsbereitschaft von Teilnehmenden mit Abschlüssen einer *Fach-, Meister-, Technikerschule, Berufs- oder Fachakademie* deutlich im Vergleich zu anderen Bildungshintergründen.

Abbildung 18: Zahlungsbereitschaften nach Wohnsituation und Urbanisierungsgrad [EUR Investitionskosten/Einheit]



¹ Im Verhältnis zum Heizen mit Erdgas, ² 0, 2, 4 oder 12 Stunden/Jahr, ³ ER-reine Eigenrecherche; ER/FI- Eigenrecherche, teils über Fachinstallateure; FI/ER Informationsbezug über Fachinstallateur, teilweise Eigenrecherche

Bei der Betrachtung von Mietern und Eigentümern, jeweils im ländlichen Raum sowie in der Stadt, wird deutlich, dass die Präferenzen in Abhängigkeit von der Wohnsituation bei Teilnehmenden in der Stadt deutlich homogener ausfallen als bei Teilnehmenden des ländlichen Raums. Insgesamt zeigen Mieter höhere Zahlungsbereitschaften für CO₂-Emissionsminderung, Einsparungen bei den Betriebskosten, politische Fördersignale und Informationsbezug durch Fachinstallateur*in. Teilnehmende aus der Stadt weisen eine geringere Zahlungsbereitschaft für politische Fördersignale auf als Teilnehmende des ländlichen Raums.

Abbildung 19: Ergebnisse der Likert-Skalen Befragung Teil 1

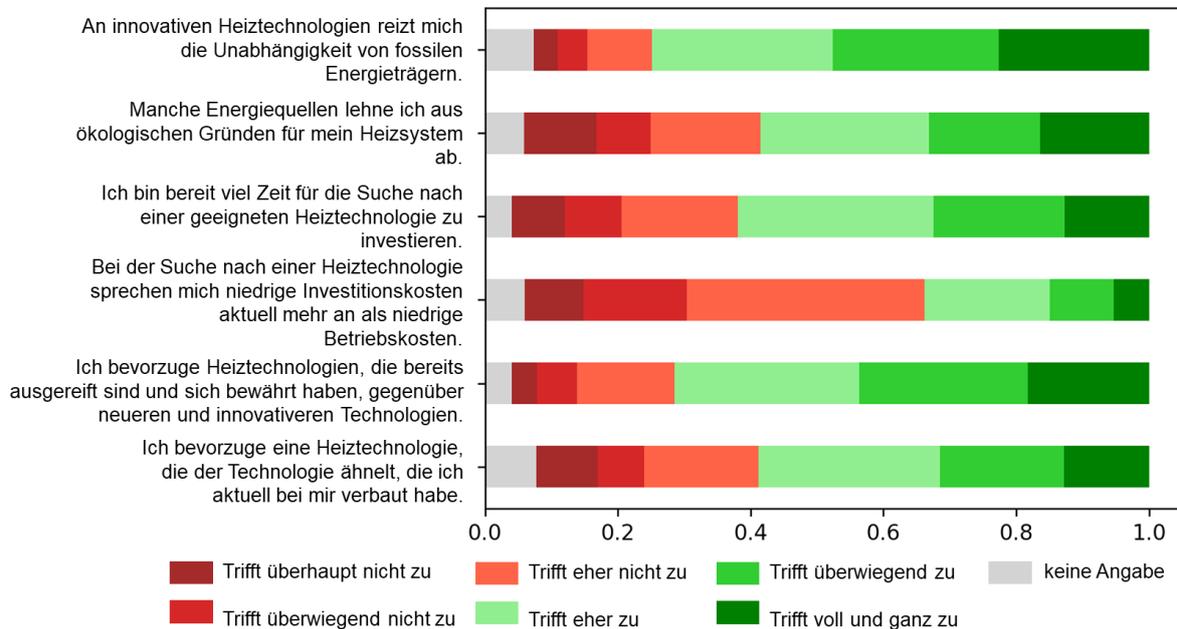
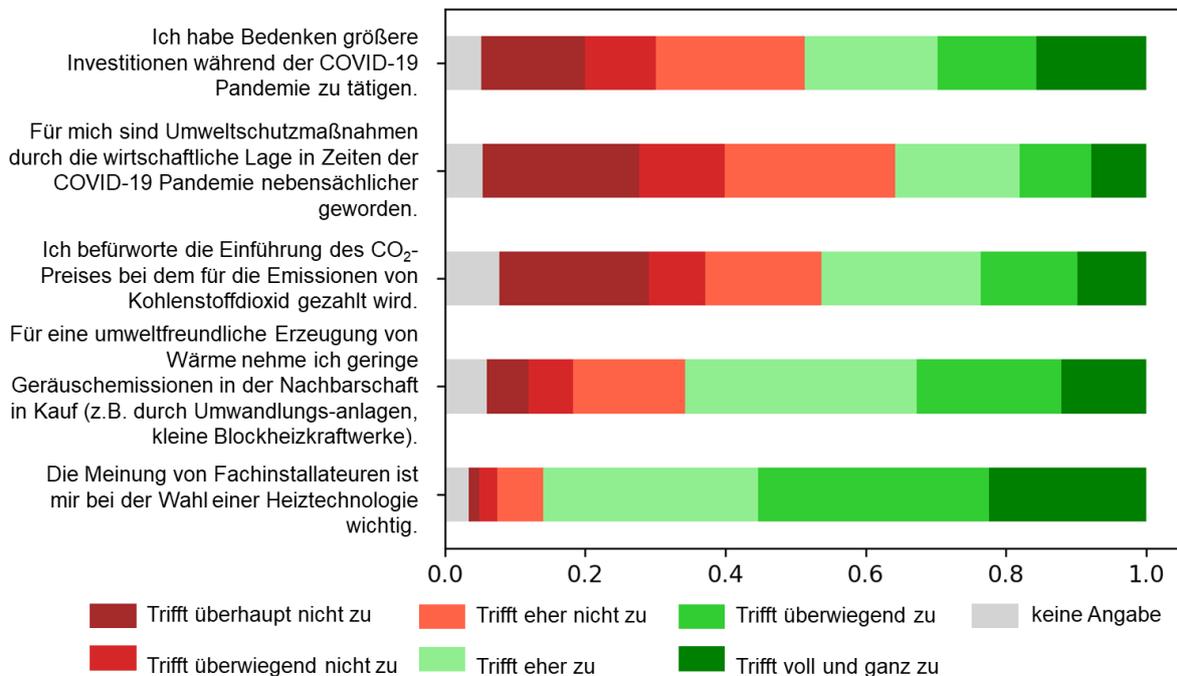


Abbildung 20: Ergebnisse der Likert-Skalen Befragung Teil 2



Die Analyse der Likert-Skalen Befragung spiegelt in vielen Punkten die Ergebnisse aus der Pilotstudie wie Abbildung 19 und

Abbildung 20 dargestellt. Die Meinung von Fachinstallateur*innen nimmt weiterhin einen großen Stellenwert ein, 86% der Teilnehmenden ist diese bei der Entscheidung für eine Heiztechnologie wichtig. Eine interessante Änderung der Ergebnisse aus der Likert-Skalen-Befragung ergibt sich hinsichtlich der Aussage: *Ich bevorzuge Heiztechnologien, die bereits ausgereift sind und sich bewährt haben*, gegenüber neueren und innovativeren Technologien. Dieser Aussage stimmen zwar 71% der Befragten zu, allerdings deutlich weniger als noch im Herbst 2020 im Rahmen der Pilotstudie. Eine mögliche Interpretation für diese Beobachtung ist, dass sich ein Wandel der Präferenzen vollzieht und die Bereitschaft zur Investition in neue und innovative, aber damit auch weniger ausgereifte Heiztechnologien steigt.

Die Ergebnisse des DCE wurden Ende September 2022 auf der *IAEE European Energy Conference "The Future of Global Energy Systems"* in Athen vorgestellt.

2.2.6 DCE-Ergebnisse als Input für TAM/INVERT

Die Ergebnisse der empirischen Erhebung fließen in einer weiteren Schnittstelle in die Diffusionsmodelle Invert/ee-lab und TAM ein. Die Daten werden dabei verwendet, um individuelle Entscheidungskalküle der Gebäudeeigentümer zu berücksichtigen und damit Entwicklungen der Marktanteile unterschiedlicher Wärmeversorgungstechnologien verbessert abschätzen zu können. Strukturelle Unterschiede der Nutzerpräferenzen in Abhängigkeit des jeweiligen soziodemographischen Hintergrundes werden dabei durch eine Betrachtung unterschiedlicher Cluster berücksichtigt. Die übergebenen Daten enthalten aus diesem Grund neben den Ergebnissen für die gesamte Stichprobe auch Ergebnisse für folgende ausgewählte soziodemographischen Faktoren:

- Geschlecht
- Stadt-Land
- Eigentümer-Mieter
- Nettohaushaltseinkommen
- Alter
- Bildungshintergrund

Für das Modell TAM, welches bestimmte Bevölkerungscluster hinterlegt hat, ist die Unterscheidung nach den Kriterien Eigentümer-Mieter, Stadt-Land und Nettohaushaltseinkommen relevant. Hier wird z. B. die Willingness-to-pay nach diesen Merkmalen zusammen mit dem mit der methodischen Erweiterung der Energiesystemoptimierungsmodell-Methode der Budget Constraint integriert. Durch eine hohe Disaggregation der relevanten Akteure kann die Haushalts- und Bevölkerungsstruktur die realitätsnäher dargestellt werden als in herkömmlichen, aggregierten Energiesystemmodellen und es können zielgruppenspezifischere Ergebnisse erzielt werden. In Abhängigkeit davon, ob die DCE-Stichprobengröße statistisch aussagekräftige Ergebnisse zuließ, wurden auch die Ergebnisse für die Kombination mehrerer soziodemographischer Kriterien (bspw. Alter und Geschlecht) an das Modell Invert/ee-lab übergeben.

2.3 Empirie als Input für das Akteursmodell PANDORA

Die empirische Analyse im Rahmen des Projektes soll unter anderem zu einem besseren Verständnis der Mechanismen führen, welche im Hinblick auf die sozio-politische Akzeptanz von Politikmaßnahmen eine Rolle spielen und zudem der Parametrisierung des PANDORA-Modells dienen. Konkret verfolgt die im Folgenden beschriebene empirische Analyse dabei die folgenden beiden Zielsetzungen:

- Die Identifikation von Faktoren, die die Akzeptanz von politischen Maßnahmen beeinflussen.
- Die Identifikation von Subgruppen, die sich bezüglich der Bedeutung und Wahrnehmung dieser Einflussfaktoren unterscheiden.

2.3.0 Grundlagen des Vignetten-Experiments

Die empirische Erhebung wird in Form eines Vignetten-Experiments umgesetzt. Bei einer Vignette handelt es sich um eine Situationsbeschreibung, die von den Befragten hinsichtlich der interessierenden Aspekte bewertet wird. Im Rahmen eines Vignetten-Experiments bewerten die Befragten mehrere Vignetten – der Inhalt der Vignetten wird dabei jeweils variiert, um feststellen zu können, welchen Einfluss die Änderungen auf die Bewertungen des Befragten haben. Im konkreten Fall wurden die Vignetten den Befragten in Form eines Zeitungsartikels präsentiert, in dem über eine geplante politische Maßnahme zur Reduzierung des CO₂-Ausstoßes von Wohngebäuden berichtet wurde. Der Text der Vignetten variierte dabei hinsichtlich folgender Aspekte:

- Inwieweit die Politikmaßnahme Ge- und Verbote enthält.
- In welchem Umfang die Politikmaßnahme mit (steuerbedingten) Preiserhöhungen für konventionelle Energieträger verbunden ist.
- Inwieweit Herstellende und Installateur*innen, die viele konventionelle Heizsysteme verkaufen, über Strafzahlungen sanktioniert werden.
- Für welche Zwecke die Einnahmen verwendet werden, die durch (steuerbedingte) Preiserhöhungen und evtl. Strafzahlungen von Herstellern oder Installateur*innen anfallen.
- Welche zivilgesellschaftlichen Akteure die geplante Politikmaßnahme kritisieren.

Zur Erfassung der sozio-politischen Akzeptanz wurden die Befragten gebeten, bei jeder Vignette anzugeben, inwieweit sie die Politikmaßnahme befürworten oder ablehnen. Um den Einfluss sozialer Normen auf die sozio-politische Akzeptanz untersuchen zu können, wurde zudem gefragt, welche Reaktionen auf die Politikmaßnahme die Befragten aus ihrem sozialen Umfeld erwarten. Weiterhin wurde jeweils die Einschätzung der Befragten dazu erhoben, für wie fair und wie wirksam sie die Politikmaßnahme halten und inwieweit sie glauben, dadurch persönlich materiell belastet zu werden – auch diese Aspekte sind potenzielle Einflussfaktoren auf die sozio-politische Akzeptanz.

Ein Vignetten-Experiment bietet sich als Methode an, da es folgende Vorteile bietet:

- Ähnlich wie bei einem DCE wird es durch die Bewertung mehrerer unterschiedlicher Vignetten pro Befragten möglich, den Einfluss von Eigenschaften der Befragten und der Politikmaßnahme (statistisch) isoliert voneinander zu analysieren.
- Hinsichtlich der Forschungsfrage ist ein Vignetten-Experiment zudem besser als ein DCE dazu geeignet, eine experimentelle Situation zu schaffen, die der realen Situation sehr ähnlich ist. Ein DCE würde es erfordern, dass die Befragten sich zwischen unterschiedlichen Politikmaßnahmen entscheiden – eine solche Entscheidungssituation kommt in der Realität in der Regel jedoch nicht vor. Das Vignetten-Experiment erlaubt es dagegen, eine Situation nachzubilden, in der jemand einen Zeitungsartikel über eine Politikmaßnahme liest und sich währenddessen eine Meinung dazu bildet.

Die hierarchische Datenstruktur, die aus einem Vignetten-Experiment resultiert (Befragte als Makro-Ebene, Vignetten als Mikro-Ebene), ermöglicht Auswertungen, durch die sich die beiden Zielsetzungen der empirischen Analyse erreichen lassen.

2.3.1 Ergebnisse des Vignetten-Experiments

Die Teilnehmerbefragung in der durchgeführten empirischen Studie erfolgte auf zwei Ebenen. Die Mikro-Ebene bildet die Beurteilung der Vignettenausprägung. Auf der Makro-Ebene (Personen-/Befragten-Ebene) werden Personenvariablen erfasst. Diese umfassen neben den sozio-demographischen Daten, wie Alter, Geschlecht, Bildung, Einkommen auch Fragen nach Umweltbewusstsein, Technikaffinität, Einstellungen zu sozialen Normen bezüglich Umwelt und Politik, politischer Einstellung und Medienkonsum. Mit den zusätzlich erhobenen Daten soll überprüft werden welche Faktoren auf das Entscheidungsverhalten bei der Beurteilung der Vignette wirken könnten. Die Stichprobenauswahl erfolgte repräsentativ nach Alter, Geschlecht, Bildung/Schulabschluss (siehe Tabelle 9). Zusätzlich aufgeführt ist die Wohnsituation der Umfrageteilnehmenden (Tabelle 10: Wohnsituation der Umfrageteilnehmenden (Tabelle 10).

Tabelle 9: Soziodemographische Faktoren der Umfrageteilnehmenden

Soziodemographische Faktoren (N = 2048)			
Geschlecht		Akademischer Abschluss	
männlich	49,3%	Kein Schulabschluss/Anderer Abschluss	1,8%
Weiblich	50,5%	Hauptschule	22,4%
Divers	0,2%	Realschule	35,4%
		Fachhochschulreife	9,1%
		Abitur	31,3%
18-29	12,1%	FMTBF ⁶	44,1%
30-39	11,9%	Fachhochschulabschluss	9,4%
40-49	15,5%	Universitätsabschluss	13,2%
50-59	25,0%	Promotion	1,9%
60-69	17,0%	Sonstiger Bildungsabschluss	0,49%
>70	18,6%	Kein akademischer Abschluss	23%

6

Soziodemographische Faktoren (N = 2048)			
Nettohaushaltseinkommen			
Weniger als 900 EUR/Monat	5,1%	3.600 - 5.000 EUR/Monat	17,3%
900 - 1.500 EUR/Monat	10,9%	5.000 - 7.000 EUR/Monat	10,6%
1.500 - 2.000 EUR/Monat	8,5%	7.000 - 8.000 EUR/Monat	2,9%
2.000 - 2.600 EUR/Monat	14,4%	Mehr als 9.000 EUR/Monat	1,8%
2.600 - 3.600 EUR/Monat	19,3%	Keine Angabe	9,1%

Tabelle 10: Wohnsituation der Umfrageteilnehmenden

Wohnsituation (N = 2048)			
Haushaltsgröße		Wohnsituation	
Einpersonenhaushalt	23,2%	Mietverhältnis in einer Wohnung	38,2%
Zweipersonenhaushalt	41,2%	Eigentümer*in einer Wohnung	11,5%
3-5 Personen-Haushalt	28,1%	Mietverhältnis in einem Haus	6,4%
Mehr als 5 Personen	1,7%	Eigentümer*in eines Hauses	43,8%
Baualtersklasse		Heiztechnologie	
vor 1949	18,6%	Ölheizung	20,1%
1949 - 1978	31,9%	Gasheizung	46,4%
1979 - 1990	17,7%	Wärmepumpe	4,4%
1991 - 2010	18,3%	Holz- oder Pelletheizung	4,7%
nach 2010	6,4%	Fernwärme	14,4%
weiß nicht / keine Angabe	7,2%	Ein anderes Heizsystem	5,0%
		Ich weiß es nicht	4,9%

Wie bereits im Kapitel 2.3 beschrieben, bewerteten die Umfrageteilnehmer*innen des Vignetten-Experiments unterschiedliche Vignetten mit randomisierten Ausprägungen. Pro Person wurden acht voneinander abweichende Vignetten präsentiert. Dem ist hinzuzufügen, dass nicht alle möglichen Kombinationen der Ausprägungen allen Umfrageteilnehmern präsentiert wurden. Ein Beispiel für eine Vignette befindet sich im Anhang des Dokuments. Die variierenden Ausprägungen der Vignetten-Attribute sind in der Tabelle dargestellt. Zu jeder Vignette wurden durch die Umfrage sechs abhängige Variablen erhoben

Tabelle 11: Vignetten-Ausprägungen

Attribut	Ausprägung pro Vignette	Baseline/Referenzkategorie ⁷
Verbote (5 Ausprägungen)	<ul style="list-style-type: none"> • Verkauf von neuen Öl- und Gasheizungen mit mittlerer Energieeffizienz ab 2025 • Verkauf von neuen Öl- und Gasheizungen mit schlechter Energieeffizienz ab 2025 • kein Verbot • zusätzliche Austauschpflicht von installierten Anlagen • keine zusätzliche Austauschpflicht von installierten Anlagen 	<ul style="list-style-type: none"> • kein Verbot des Verkaufs von neuen Öl- und Gasheizungen mit schlechter Energieeffizienz ab 2025 • keine zusätzliche Austauschpflicht von installierten Anlagen
Höhe CO ₂ -Steuer – entstehende Mehrkosten pro Jahr (6 Ausprägungen)	<ul style="list-style-type: none"> • 150 EUR • 400 EUR • 650 EUR • 900 EUR • 1.150 EUR • 1.400 EUR 	<ul style="list-style-type: none"> • 150 EUR
Strafzahlungen (5 Ausprägungen)	<ul style="list-style-type: none"> • Mittlere bis hohe Strafzahlungen • niedrige bis mittlere Strafzahlungen • keine Strafzahlungen • für entweder Herstellende • oder Installateur*in 	<ul style="list-style-type: none"> • keine Strafzahlungen
Mittelverwendung (6 Ausprägungen)	<ul style="list-style-type: none"> • Entlastung für einkommensschwache Haushalte • Entlastung für Mietende • Entlastung für Familien mit Kindern • Entlastung für Forschung & Entwicklung • Kaufprämie für erneuerbare Heizsysteme • keine Regelung 	<ul style="list-style-type: none"> • keine Regelung
Kritiker:Innen (5 Ausprägungen)	<ul style="list-style-type: none"> • der vorgelegte Gesetzesentwurf wurde kritisiert durch Umweltverbände • der vorgelegte Gesetzesentwurf wurde kritisiert durch den Mieterbund • der vorgelegte Gesetzesentwurf wurde kritisiert durch Eigenheimbesitzende 	<ul style="list-style-type: none"> • der vorgelegte Gesetzesentwurf wurde kritisiert durch Verbände der Heizungsbranche

⁷ Die Referenzkategorie wird für die Anwendung der Linearen Regression festgelegt

Attribut	Ausprägung pro Vignette	Baseline/Referenzkategorie ⁷
	<ul style="list-style-type: none"> • der vorgelegte Gesetzesentwurf wurde kritisiert durch Sozialverbände • der vorgelegte Gesetzesentwurf wurde kritisiert durch Verbände der Heizungsbranche 	

Tabelle 12: Vignetten-Experiment – Abhängige Variablen

Akzeptanz – individuell:

Ich würde diesen Gesetzentwurf...

1 = voll und ganz ablehnen – 6 = voll und ganz befürworten

Akzeptanz – Peers:

Die meisten Menschen, die mir wichtig sind, würden diesen Gesetzentwurf...

1 = voll und ganz ablehnen – 6 = voll und ganz befürworten

Belastung:

Durch die vorgeschlagenen Maßnahmen würden spürbare Belastungen auf mich zukommen.

1 = trifft überhaupt nicht zu – 6 = trifft voll und ganz zu

Fairness / Gerechtigkeit:

Dieser Gesetzesentwurf ist ausgewogen und fair.

1 = trifft überhaupt nicht zu – 6 = trifft voll und ganz zu

Sinnhaftigkeit/ Effektivität:

Die vorgeschlagenen Maßnahmen wären ein sinnvoller Beitrag zum Klimaschutz.

1 = trifft überhaupt nicht zu – 6 = trifft voll und ganz zu

Nicht weit genug:

Die vorgeschlagenen Maßnahmengehen nicht weit genug.

1 = trifft überhaupt nicht zu – 6 = trifft voll und ganz zu

Um einen ersten Überblick über die Daten zu erhalten wurden die Abhängigen Variablen (siehe) über alle Vignetten hinweg analysiert. Die Ergebnisse deuten darauf hin, dass eine signifikante Korrelation zwischen der wahrgenommenen Fairness und persönlichen Belastung einer politischen Maßnahme und der entsprechenden Akzeptanz dieser besteht. Hinsichtlich der sozio-demografischen Daten besteht eine Korrelation mit den Personenvariablen Alter, Schul- bzw. beruflicher Abschluss und Einkommen. Die Auswertung ergab auch eine Korrelation zwischen abhängigen Variablen und den Faktoren Umweltbewusstsein und Technikaffinität.

Lineare Regression

Ein Ziel des Vignetten-Experiments ist die Analyse der Faktoren, die einen möglichen Einfluss auf die individuelle Akzeptanz einer politischen Maßnahme haben können. Einerseits soll überprüft werden ob bestimmte sozio-demographische Daten oder normative Einstellungen mit der Abhängigen Variable „individuelle Akzeptanz“ korrelieren. Andererseits soll überprüft werden, ob eine Korrelation zwischen den sechs abhängigen Variablen untereinander besteht und die Beurteilung von Fairness/ Effektivität/ Belastung/ oder Sinnhaftigkeit einer politischen Maßnahme die Akzeptanz dieser beeinflusst.

Bei den statistischen Analysen von Daten eines Vignetten-Experiments mittels Regressionsmodellen ist gegebenenfalls die hierarchische Natur der Daten zu beachten. Denn wenn die Umfrageteilnehmer*innen mehrere Vignetten beurteilen (im Falle unseres Experiments sind es acht aufeinander folgende Vignetten), so sind die einzelnen Urteile nicht stochastisch unabhängig voneinander. Daher müssen in solchen Fällen in der Regel hierarchische Regressionsmodelle (Mehrebenenmodelle) eingesetzt werden. Da jedoch die Regressionskoeffizienten in erster Linie für den Einsatz im Modell PANDORA abgeleitet werden, reicht aus unserer Sicht eine vereinfachte Auswertung der Ergebnisse. Dies bedeutet, dass jede Vignette unabhängig gewertet wird und das Ordinary-Least-Squares Regressionsmodell angewendet werden kann.

Die unabhängigen Daten des Vignettenexperiments (Ausprägungen der Attribute der politischen Maßnahme) hauptsächlich nominal (bzw. ordinal im Falle der Ausprägung der CO₂-Steuer) vorliegen wird für die lineare Regression dummy-kodiert. Für eine bessere Lesbarkeit der Ergebnisse, wurden die Variablen aus der Befragung (Werte der Likert-Skala von 0 bis 6) auf den Bereich von -1 bis +1 normiert. Da sich die Variable ‚nicht weit genug‘ schon zu Beginn der Auswertung als vernachlässigbar herausgestellt hat, wird bei den nachfolgenden Auswertungen auf die Darstellung dieser verzichtet.

Tabelle 13 zeigt die Regressionskoeffizienten der Ausprägungen der Politikmaßnahmen. Auffällig signifikant ist die Korrelation zwischen den verschiedenen Ausprägungen der CO₂-Steuern sowie der Mittelverwendung und den abhängigen Variablen. Dabei sind alle Werte der CO₂-Steuer negativ korreliert mit Akzeptanz, Akzeptanz-Peers, Fairness und Sinnhaftigkeit und positiv korreliert mit Belastung. Genau umgekehrt verhält es sich bei der Mittelverwendung. Signifikant ist auch die Korrelation der Verbote, auf alle abhängigen Variablen außer der persönlichen Belastung. Bei den Attributen Strafzahlungen und Kritikäußerung sind nur einzelne Posten

Tabelle 13: Regressionskoeffizienten der abhängigen Variablen auf die Ausprägungen der Politikmaßnahme

Ausprägungen der Politikmaßnahme	Regressionskoeffizienten				
	Akzeptanz	Akzeptanz Peers	Belastung	Fairness	Sinnhaftigkeit
CO2-Steuer_2	-0.0546*	-0.0549*	0.0649*	-0.0463*	-0.0186*
CO2-Steuer_3	-0.0930*	-0.0907*	0.0901*	-0.0756*	-0.0305*
CO2-Steuer_4	-0.1262*	-0.1195*	0.1153*	-0.0994*	-0.0421*
CO2-Steuer_5	-0.1503*	-0.1403*	0.1225*	-0.1219*	-0.0557*
CO2-Steuer_6	-0.1671*	-0.1539*	0.1271*	-0.1318*	-0.0596*
Verbote_1	0.0208*	0.0156*	0.0069	0.0157*	0.0418*
Verbote_2	0.0214*	0.0135*	0.0012	0.0207*	0.0304*
Verbote_3	0.0272*	0.0219**	0.0162*	0.0254*	0.0549*
Verbote_4	0.0187*	0.0149*	0.0025	0.0146*	0.0322*
Strafzahlungen_1	0.0145**	0.0131**	0.0106	0.0108**	0.0056
Strafzahlungen_2	0.0060	0.0013	0.0022	0.0019	-0.0061
Strafzahlungen_4	0.0015	0.0026	0.0032	-0.0017	0.0013
Strafzahlungen_5	0.0051	0.0047	0.0034	0.0009	-0.0048
Mittelverwendung_1	0.0255*	0.0164*	0.0014	0.0143**	0.0168*
Mittelverwendung_2	0.0397*	0.0277*	-0.0129**	0.0272*	0.0239*
Mittelverwendung_3	0.0397*	0.0306*	-0.0215*	0.0309*	0.0184*
Mittelverwendung_4	0.0364*	0.0311*	-0.0169*	0.0264*	0.0172*
Mittelverwendung_5	0.0218*	0.0185*	-0.0115	0.0134**	0.0113
Kritik_1	0.0026	0.0003	-0.0001	0.0061	-0.0034
Kritik_2	0.0105	0.0053	0.0002	0.0111**	0.0042
Kritik_3	0.0026	-0.0019	0.0083	0.0067	0.0105
Kritik_4	0.0090	0.0029	0.0094	0.0130**	0.0078

*Correlation is significant at the 0.01 level (2-tailed)
**Correlation is significant at the 0.05 level (2-tailed)

Auch die Regressionskoeffizienten zwischen den Variablen Akzeptanz, Akzeptanz-Peers, Fairness, Belastung und Sinnhaftigkeit untereinander wurden abgeleitet. Tabelle zeigt die Regressionskoeffizienten der, in diesem Fall, unabhängigen Variable Akzeptanz. Eine sehr hohe Korrelation besteht zwischen der individuellen Akzeptanz und Fairness. Etwas geringer, aber dennoch hoch ist die Korrelation der Variablen Sinnhaftigkeit mit Akzeptanz. Die Variable Belastung ist negativ korreliert mit Akzeptanz und eher gering, im Vergleich zu den anderen Variablen.

Latent Class Analysis

In einem weiteren Analyseschritt wurde eine Latent Class Analysis (LCA) durchgeführt. Die Latent Class Analyse (LCA) ist eine modellbasierte Clustertechnik, die in verschiedenen Forschungsfeldern Anwendung findet, um unbeobachtete heterogene Subgruppen innerhalb einer Gesamtpopulation zu identifizieren. Die grundlegende Annahme der LCA ist, dass die Bevölkerung aus verschiedenen, nicht direkt beobachtbaren Klassen besteht, die sich durch bestimmte Charakteristika unterscheiden. Dies ist besonders nützlich in den Sozialwissenschaften, der Psychologie, der Marktforschung und anderen Bereichen, in denen Gruppen mit ähnlichen Merkmalen oder Verhaltensweisen identifiziert werden sollen, die jedoch nicht direkt sichtbar sind. Bei der Durchführung einer LCA werden auf Basis von beobachteten Daten, wie Umfrageantworten oder Messwerten, Wahrscheinlichkeiten zugeordnet, die anzeigen, mit welcher Wahrscheinlichkeit bestimmte Beobachtungen zu einer bestimmten latenten Klasse gehören. Dieser Ansatz ermöglicht es, die Struktur in den Daten zu erkennen, die sonst durch traditionelle Clusteranalysemethoden verborgen bleiben könnte. Einer der Hauptvorteile der LCA gegenüber herkömmlichen Clusterverfahren ist ihre Wahrscheinlichkeitsbasis. Anstelle von heuristischen Distanzmaßen werden explizite statistische Modelle verwendet, die eine probabilistische Interpretation der Klassenzugehörigkeit erlauben. Dies ermöglicht eine fundierte Schätzung der Anzahl der Klassen sowie eine Bewertung der Modellgüte. Zur Beurteilung und zum Vergleich verschiedener Modelllösungen bietet die LCA eine Reihe von Gütekriterien. Ein Beispiel hierfür ist das Bayes'sche Informationskriterium (BIC), das eine Abwägung zwischen Modellanpassung und Modellkomplexität vornimmt. Modelle mit einem niedrigeren BIC-Wert werden in der Regel bevorzugt, da sie eine bessere Balance zwischen Erklärungskraft und Einfachheit bieten.

Für die Analyse wurde ein zweistufiges Verfahren ausgewählt, welches auf dem komplexen Datensatz der Umfrage durchgeführt wurde. Ziel war es, latente Klassen innerhalb der Daten zu identifizieren und zu verstehen, wie verschiedene gemessene Variablen diese Klassen charakterisieren. Auf der ersten Ebene, der "Within"-Ebene, werden individuelle Unterschiede innerhalb der geclusterten Einheiten untersucht. Hier werden Modelle für jeden der latenten Klassen spezifiziert, die auf Variablen basieren, die das Belastungsempfinden (burden), die wahrgenommene Fairness (fairness) und das Maß an Sinnhaftigkeit (ma_sense) sowie weitere Variablen wie Steuereinstellungen und Einstellungen zu verschiedenen Lebensbereichen abbilden. Auf der zweiten Ebene, der "Between"-Ebene, werden Unterschiede zwischen den Klassen analysiert. Hier wird untersucht, wie demografische und sozioökonomische Variablen (wie Alter, Bildung und Einkommen) sowie Einstellungen und Meinungen zu Technologie, Politik und Umwelt die Zugehörigkeit zu den verschiedenen latenten Klassen beeinflussen. Aufgrund der Komplexität des Modells war die Verwendung der Monte-Carlo-Integration, notwendig.

Im ersten Schritt der LCA wurde überprüft, welche Klassenlösung die beste Option darstellt. Hierzu wurden mehrere Klassenlösungen durchgerechnet und untereinander verglichen. Einen Überblick über die entsprechenden Faktoren, auf deren Basis die Auswahl der Klassenlösung gibt Tabelle 14.

Tabelle 14: Auswertungen der LCA Klassenlösungen

	LL	BIC(LL)	Degrees of freedom	p-value (Likelihood Ratio Test)	(Class error) Classification quality
2-Class	-63634	128,510.912	134		0.955
3-Class	-62016	126,019.185	214	<0.001	0.942
4-Class	-60804	124,336.509	294	<0.001	0.920
5-Class	-59761	122,992.710	374	<0.001	0.940
6-Class	-58884	120,537.776	454	<0.001	0.95

Basierend auf dem Vergleich der Modelle von einer 2- bis zu einer 6-Klassenlösung, scheint das 5-Klassenmodell die bevorzugte Lösung zu sein. Die Auswahl dieses Modells kann durch mehrere Faktoren begründet werden:

- Bayes'sches Informationskriterium (BIC): Das BIC des 5-Klassenmodells ist niedriger als das der 2-, 3- und 4-Klassenmodelle, was auf eine bessere Modellanpassung bei angemessener Komplexität hinweist. Obwohl das 6-Klassenmodell ein noch niedrigeres BIC aufweist, ist der Unterschied zum 5-Klassenmodell nicht so ausgeprägt, was darauf hindeutet, dass das 5-Klassenmodell eine ausreichend gute Passform bietet, ohne unnötige Komplexität hinzuzufügen.
- Log-Likelihood (LL): Das 5-Klassenmodell hat eine höhere LL als die Modelle mit weniger Klassen, was auf eine stärkere Unterstützung der Daten für das 5-Klassenmodell hindeutet. Auch hier gilt, obwohl das 6-Klassenmodell eine noch höhere LL aufweist, dass der marginale Gewinn in der LL möglicherweise nicht die zusätzliche Komplexität rechtfertigt.
- p-Wert des Likelihood-Ratio-Tests: Die signifikanten p-Werte ($p < 0.001$) für Modelle mit mehr als zwei Klassen zeigen, dass diese Modelle signifikant besser sind als das einfachere Modell. Dies gilt für alle Modelle von 3 bis 6 Klassen und trägt nicht direkt zur Entscheidung zwischen dem 5- und 6-Klassenmodell bei.
- Klassifikationsqualität (Class error): Die Klassifikationsqualität bleibt zwischen dem 5- und 6-Klassenmodell relativ stabil, mit einer leichten Verbesserung im 6-Klassenmodell. Dennoch könnte der geringfügige Anstieg der Klassifikationsqualität im 6-Klassenmodell im Vergleich zum 5-Klassenmodell als unzureichend angesehen werden, um die höhere Komplexität und die potenzielle Überanpassung des Modells zu rechtfertigen.
- Freiheitsgrade (Degrees of Freedom): Mit steigender Klassenanzahl erhöht sich die Anzahl der Freiheitsgrade, was auf ein komplexeres Modell hinweist. Das 5-Klassenmodell bietet einen guten Kompromiss zwischen Modellanpassung und Modellkomplexität.

Basierend auf dem 5-Klassen-Modell führte die LCA zu einer Segmentierung der Studienteilnehmer in fünf unterschiedliche Klassen. Zusätzlich zu den abhängigen Variablen wurden soziodemographische Merkmale, Interesse an neuen Technologien, Umwelteinstellungen, politische Orientierung und Einstellungen zu Verantwortung und Kontrolle in Bezug auf energiepolitische Maßnahmen in die Klassifizierung einbezogen. Jede Klasse stellt eine einzigartige Kombination dieser Merkmale dar, die einen tieferen Einblick in das Verhalten und die Einstellungen der Befragten ermöglicht. In Tabelle 15 sind die Ausprägungen der Merkmale verglichen zum Gesamtdurchschnitt nach Klasse dargestellt.

Tabelle 15: Beschreibung der Klassen der Latent Class Analyse nach ihren Merkmalen

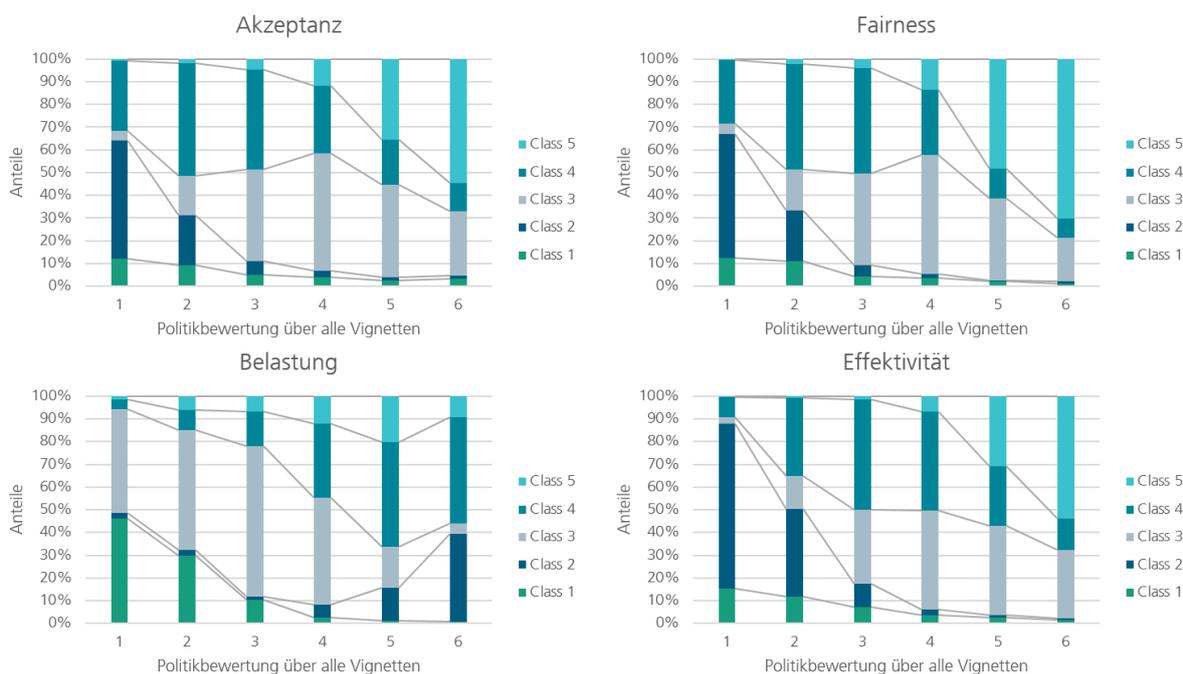
Merkmale	Klasse 1	Klasse 2	Klasse 3	Klasse 4	Klasse 5
Sozio-demografisch	Größerer Anteil an Familien mit Kindern und ein höherer Prozentsatz an Haus/Wohnungsbesitzern, höheres Einkommen	Älter, größere Haushaltsgröße, niedrigeres Einkommen, durchschnittlicher Haus-/Wohnungsbesitz	Jünger, durchschnittliches Einkommen, höherer Anteil an Personen mit akademischen Qualifikationen und Abschlüssen, durchschnittlicher Haus-/Wohnungsbesitz	Älter, kleinere Haushaltsgröße, durchschnittliches Einkommen, durchschnittlicher Haus-/Wohnungsbesitz	Jüngste Gruppe, hoher Anteil an Familien mit Kindern, durchschnittliches Einkommen, höchster Anteil an Personen mit akademischen Qualifikationen und Abschlüssen, niedrigerer Anteil an Haus-/Wohnungsbesitzern
Interesse an Technologie	Mehr Interesse an neuer Technologie, aber sehr niedrige Nutzung von fossil betriebenen Heiztechnologien	Geringeres Interesse an neuer Technologie	Niedrigstes Interesse an neuer Technologie	Geringeres Interesse an neuer Technologie	Sehr hohes Interesse an neuer Technologie
Umweltein-stellung	Geringe Besorgnis um Umweltprobleme	Sehr geringe Besorgnis um Umweltprobleme	Hohe Besorgnis um Umweltprobleme	Durchschnittliche Besorgnis um Umweltprobleme	Sehr hohe Besorgnis um Umweltprobleme
Politik	Durchschnittliches politisches Interesse und politische Ideologie, geringe Bedeutung der Erwartungen/Meinungen von Freunden und Familie (politischer Ansichten), weniger häufige politische Diskussionen	Stark rechtsgerichtete politische Einstellung, höheres politisches Interesse und häufigere politische Diskussionen	Durchschnittliches politisches Interesse und politische Einstellung, sehr hohe Bedeutung der Erwartungen/Meinungen von Freunden und Familie	Politische Ansichtsabweichung nach links, durchschnittliches politisches Interesse,	Durchschnittliches politisches Interesse und politische Einstellung, sehr hohe Bedeutung der Erwartungen/Meinungen von Freunden und Familie
Verantwortung und Kontrolle	Geringere Überzeugung, dass Steuern ein effektiver Kontrollmechanismus zur Reduzierung von Emissionen sind, geringerer Glaube an Selbstverantwortung und höherer Glaube an staatliche Verantwortung	Starke Abneigung gegen staatliche Maßnahmen (und Verantwortung) zur Reduzierung von Emissionen, besonders Steuern, sehr geringer Glaube an Selbstverantwortung für die Reduktion von Emissionen	Sehr starke Überzeugung, dass Steuern ein effektiver Kontrollmechanismus zur Reduktion von Emissionen sind, höhere Überzeugung der Selbstverantwortung	Starke Überzeugung, dass Industrie und Herstellung die Verantwortung und Kontrollmechanismen haben, um Emissionen im Gebäudesektor effektiv zu reduzieren	Starke Überzeugung, dass staatliche Maßnahmen effektiv sind, um Emissionen zu reduzieren, hoher Glaube an Kontrolle und Selbstverantwortung für die Reduktion von Emissionen im Gebäudesektor

Diese Profile zeigen, wie die Mitglieder einer Klasse in Bezug auf die gemessenen Variablen tendenziell zusammengefasst werden können. Durch die Klassenbildung liefert die LCA Einsichten in die Struktur der Population. Dies kann hilfreich sein, um zu verstehen, welche Subpopulationen existieren und wie sie sich in Bezug auf interessierende Merkmale oder Verhaltensweisen unterscheiden. Die Ergebnisse der Latent Class Analyse bieten wertvolle Einblicke in die Vielschichtigkeit der Bevölkerung hinsichtlich ihrer Einstellungen. Die beobachteten sozio-demografischen Unterschiede bestätigen, dass individuelle Attribute wie Alter, Haushaltsgröße, Einkommen und Bildungsstand eine zentrale Rolle bei der Formung von Akzeptanz von Politikmaßnahmen eine wichtige Rolle spielen. Die politische Orientierung innerhalb der Klassen offenbart eine Spannweite von Meinungen. Ein interessantes Ergebnis ist, dass zwischen den Gruppen unterschiedliche Ansichten darüber bestehen, wer die Führung bei der Bewältigung von Klima- und Umweltfragen übernehmen sollte. Während manche staatliche Maßnahmen bevorzugen, setzen andere auf Marktmechanismen als eine wirkungsvolle Maßnahme um Emissionsminderungen im Gebäudesektor zu erzielen.

Zusätzlich zeigt Abbildung 21, dass die Bewertungsmuster der Politikmaßnahme sich für die Klassen hinsichtlich der Akzeptanz sowie der wahrgenommenen Fairnes, finanziellen Belastung und Effektivität sich deutlich voneinander unterscheiden.

Für die Übersicht der Ergebnisse des Vignetten-Experiments ist eine Veröffentlichung geplant.

Abbildung 21: Übersicht über die klassenspezifische Bewertung politischer Maßnahmen über alle präsentierten Vignetten



2.3.2 Einbindung der Ergebnisse in PANDORA

Empirische Erhebungen erfassen eine Momentaufnahme eines bestimmten Phänomens zu einem bestimmten Zeitpunkt und an einem bestimmten Ort. In einer Umfrage bildet sich jeder Teilnehmer seine Meinung unabhängig und isoliert. Diese Meinungen können sich jedoch ändern, wenn die Personen mit anderen interagieren oder neuen Informationen ausgesetzt sind. Die agenten-basierte Modellierung bietet eine Möglichkeit den Einfluss des sozialen Netzwerks durch die Simulation der Interaktionen zwischen einzelnen Agenten innerhalb eines dynamischen Systems zu über-

prüfen. Dabei können Auswirkungen der Variation verschiedener Parameter auf das Systemverhalten untersucht werden. Diese Flexibilität ermöglicht nicht nur die Prüfung verschiedener politischer Szenarien, sondern erleichtert auch die Identifizierung zugrunde liegender Mechanismen und Muster, die in einer einzelnen empirischen Momentaufnahme nicht unmittelbar erkennbar sind.

Zur Erforschung des Potenzials in der Simulation der Dynamik sozio-politischer Akzeptanz verwenden wir einen neuartigen Modellierungsansatz, der empirische Daten, etablierte Theorien aus der Sozialpsychologie und Meinungsdynamik ('opinion dynamics') mit agentenbasierten Modellen integriert. Mit dem agenten-basierten Modell PANDORA wird explorativ untersucht, wie der Prozess der Einstellungsbildung gegenüber einer neuen Politikmaßnahme in einem Modell formalisiert werden kann. Besonders im Fokus steht die Untersuchung des Einflusses, den dynamische Interaktionen innerhalb sozialer Netzwerke auf die individuelle Akzeptanz neuer politischer Maßnahmen haben. Das Ziel des Modells ist es für verschieden konfigurierte politische Maßnahmenpakete abzuleiten, wie die Interaktion in einem sozialen Netzwerk die Einstellung zu einer Politik beeinflussen könnte. Hierzu nutzen wir die Stärke der agenten-basierten Modellierung die Heterogenität von Agenten abzubilden.

Über das Vignetten-Experiment werden Parameter erfasst, um den Akzeptanzprozess der individuellen Akteure im Modell abbilden zu können. Der Fragebogen erfasst zudem Personendaten, welche zur weiterführenden Parametrisierung der individuellen Akteure genutzt werden können.

Die konzeptionelle Entwicklung von PANDORA erfolgt in weiten Teilen analog zur Konzipierung des oben beschriebenen Vignetten-Experiments, sodass die Ergebnisse aus der empirischen Untersuchung direkt als Input in das Modell integriert werden können. So ist die Datenanalyse und die lineare Regression (Kapitel 2.3.1.1) aus dem Vignetten-Experiment dem Modell direkt vorangeschaltet. Auf diese Weise lässt sich das Modell schnell anpassen, wenn zum Beispiel unterschiedliche Teildaten für die Analyse im Modell eingesetzt werden sollen.

Für den weiteren Aufbau des Modells und zur Bewertung der Akzeptanz wird ein Mediationsmodell verwendet. Die Hypothese ist hierbei, dass die Beurteilung einer Politikmaßnahme über die Mediations-Variablen Fairness, Sinnhaftigkeit und Belastung erfolgt (siehe Abbildung 22). Dies bedeutet insofern, dass bei der Konfrontation mit der Information zur Ausgestaltung der Politikmaßnahme ein Agent zuerst ein Urteil über die Wahrnehmung dieser bildet, was schließlich zur finalen Bewertung der Maßnahme und zur individuellen Akzeptanz oder Ablehnung führt. Die Darstellung des Einflusses sozio-demographischer Faktoren erfolgt über die Gruppenzugehörigkeit des Agenten.

Die empirisch erhobenen Daten werden dazu verwendet Agenten im Modell zu initialisieren. Zu Beginn des Modelllaufs werden soziale Gruppen definiert, die in sich möglichst homogen sind, sich jedoch voneinander deutlich abgrenzen lassen. Hierzu werden die Ergebnisse der Latent-Class-Analyse hinzugezogen. Aus der Klassenzugehörigkeit lassen sich zusätzlich die entsprechenden sozio-demographischen Daten ableiten, die zur Netzwerkinitialisierung und zum Aufbau des Kommunikationsmodells verwendet werden. Die detaillierte Modellbeschreibung befindet sich im Anhang zum Dokument (siehe A.1.1).Modellbeschreibung PANDORA

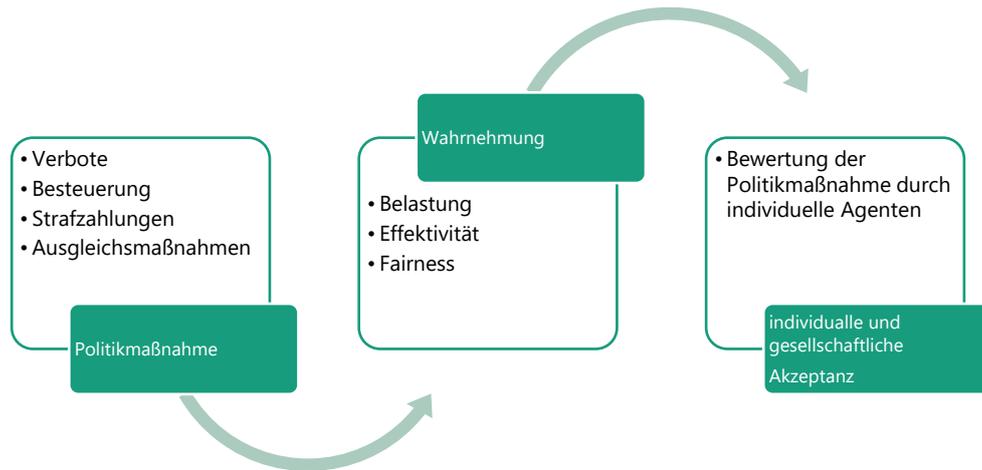


Abbildung 22: Wahrnehmung der Politikmaßnahme als Mediator für individuelle Akzeptanz

Für die jeweiligen Gruppen werden Regressionskoeffizienten ermittelt (analog zum Vorgehen beschrieben in Kapitel 2.3.1.1). Im Fokus steht einerseits die Korrelation zwischen den Attributen der Politikmaßnahme und den Mediationsvariablen. Andererseits die Korrelation zwischen individueller Akzeptanz und den Mediationsvariablen. Die ermittelten Koeffizienten fließen als Vektoren in das Modell ein.

3 **Abbildungsverzeichnis**

Abbildung 1: Empirie- und Modellschnittstellen und Modellintegration.....	5
Abbildung 2: Ausschnitt aus dem bereinigten Conceptboard mit den Ergebnissen des Expert*innen-Workshops	11
Abbildung 3: Prozessschaubild - Ermittlung der Investitionsbereitschaft.....	15
Abbildung 4: Ergebnisse der Likert-Skalen-Befragung der Pilotstudie (Teil 1)	18
Abbildung 5: Ergebnisse der Likert-Skalen-Befragung der Pilotstudie (Teil 2)	18
Abbildung 6: Höchster Bildungsabschluss.....	21
Abbildung 7: Haushaltsgröße	21
Abbildung 8: Begriffe der Verhaltensanalyse zur theoretischen Strukturierung des Leitfadens und zur Analyse des Kauf- und Auswahlverhaltens von Heiztechnologien durch potentielle Adopter*innen.....	23
Abbildung 9: Konzeptkarte der Prozessschritte, Verhaltenssequenzen und deren zeitlicher Dauer für Fall 1.....	27
Abbildung 10: Konzeptkarte der Prozessschritte, Verhaltenssequenzen und deren zeitlicher Dauer für Fall 4.....	28
Abbildung 11: Zusammenfassung der abstrahierten Verhaltensweisen und deren zeitliche Dauer	29
Abbildung 12: Gewichtung individueller Kontingenzen des Auswahlverhaltens anhand der Auftretenshäufigkeit bei den 11 betrachteten Adopter*innen.....	30
Abbildung 13: Gewichtung individueller Kontingenzen des Auswahlverhaltens anhand der relativen Häufigkeit in allen kodierten Textsegmenten der Kategorie „operant contingencies choosing heating system – contingencies“	32
Abbildung 14: Gewichtung der Kontingenzen des Auswahlverhaltens in der Interaktion mit Installateuren anhand der Auftretenshäufigkeit bei den 11 betrachteten Adopter*innen	35
Abbildung 15: Gewichtung der Kontingenzen des Auswahlverhaltens in der Interaktion mit Installateur*innen anhand der relativen Häufigkeit in allen kodierten Textsegmenten der Kategorie „operant contingencies choosing heating system – interlocking contingencies technicians“	36
Abbildung 16: Zahlungsbereitschaften nach Geschlecht [EUR Investitionskosten/Einheit]	48
Abbildung 17: Zahlungsbereitschaften nach Bildungsgrad [EUR Investitionskosten/Einheit].....	49
Abbildung 18: Zahlungsbereitschaften nach Wohnsituation und Urbanisierungsgrad [EUR Investitionskosten/Einheit].....	50
Abbildung 19: Ergebnisse der Likert-Skalen Befragung Teil 1	51
Abbildung 20: Ergebnisse der Likert-Skalen Befragung Teil 2	51

Abbildung 21: Übersicht über die klassenspezifische Bewertung politischer Maßnahmen über alle präsentierten Vignetten	63
Abbildung 22: Wahrnehmung der Politikmaßnahme als Mediator für individuelle Akzeptanz	65
Abbildung 23: Struktur des Modells PANDORA.....	74
Abbildung 24: Struktur des Simulationsmodells Invert/EE-Lab (Quelle: Steinbach 2015).....	77
Abbildung 25: Struktur der hinterlegten Gebäudetypologie in Invert/ EE-Lab	78
Abbildung 26: Modellierung der Gebäudeeigentümer als Investor-Agenten	79
Abbildung 27: Schematische Darstellung der Modellierung von Politikinstrumente in Invert-Agents (Quelle: Steinbach, 2015).....	80
Abbildung 28: Darstellung die abgebildeten Akteursgruppen in TAM (Quelle: Universität Stuttgart – IER).....	81
Abbildung 29: Modellrahmen ENERTILE (Quelle: Fraunhofer ISI)	83
Abbildung 30: Schematische Darstellung des in REMod-D abgebildeten Energiesystems ohne die Darstellung der Subsysteme für Wärmeversorgung von Gebäuden und Verkehr (Quelle: Fraunhofer ISE)	85
Abbildung 31: Optimierendes Energiesystemmodell TIMES-D.....	87

4 Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Ergebnisse des Discrete Choice Experimentes der Pilotstudie für die gesamte Stich-probe	17
Tabelle 2: Prozessschritte der Teilnehmenden und (geplante) Heiztechnologien	25
Tabelle 3: Von Teilnehmenden benannte Fördernisse für mehr innovative, regenerative Heiztechnologien sortiert nach Häufigkeit.....	39
Tabelle 4: Wahl der Attribute und Ausprägungen für das DCE	41
Tabelle 5: DCE Choice Set Design (*siehe Definition Tabelle 4)	42
Tabelle 6: Soziodemographische Faktoren der Umfrageteilnehmenden.....	44
Tabelle 7: Wohnsituation der Umfrageteilnehmenden.....	45
Tabelle 8: Ergebnisse des Discrete Choice Experimentes für die gesamte Stichprobe	46
Tabelle 9: Soziodemographische Faktoren der Umfrageteilnehmenden.....	54
Tabelle 10: Wohnsituation der Umfrageteilnehmenden	55
Tabelle 11: Vignetten-Ausprägungen.....	56
Tabelle 12: Vignetten-Experiment – Abhängige Variablen.....	57
Tabelle 13: Regressionskoeffizienten der abhängigen Variablen auf die Ausprägungen der Politikmaßnahme.....	59
Tabelle 14: Auswertungen der LCA Klassenlösungen.....	61
Tabelle 15: Beschreibung der Klassen der Latent Class Analyse nach ihren Merkmalen.....	62

5 Literaturverzeichnis

- Achtnicht, M. (2010, 1. Dezember). Do Environmental Benefits Matter? A Choice Experiment Among House Owners in Germany (E.ON Energy Research Center, Future Energy Consumer Needs and Behavior (FCN) 27/2010). E.ON Energy Research Center, Future Energy Consumer Needs and Behavior (FCN).
https://econpapers.repec.org/paper/riscnwpa/2010_5f027.htm
- Ahanchian, M.; Bailey, I.; Dobbins, A.; Tash, A.; Fahl, U. (2020): Optimale Struktur von dezentralen und zentralen Technologien im Systemverbund – Intelligente dezentrale Energiesysteme. Förderkennzeichen: 03ET4026. Schlussbericht. Institut für Energiewirtschaft und Rationelle Energieanwendung (IER), Universität Stuttgart. Verfügbar unter: https://www.ier.uni-stuttgart.de/forschung/projekte/abgeschlossen/dezentral/downloads/BMWi-03ET4026_Schlussbericht_Dezentral.pdf
- Beyer, C., Hermelink, A., Klaus, S., Kleßmann, C., Krechting, A., Müller, A., & Palenberg, A. (2010). Innovative Politikmaßnahmen für mehr Energieeffizienz - Vorschlag für Politikmaßnahmen zur Steigerung der Energieeffizienz im Gebäudesektor in Deutschland bis 2020.
www.ecofys.com
- Boguñá M, Pastor-Satorras R, Díaz-Guilera A et al. (2004) Models of social networks based on social distance attachment. *Phys Rev E Stat Nonlin Soft Matter Phys* 70:56122.
<https://doi.org/10.1103/PhysRevE.70.056122>
- Castro J, Drews S, Exadaktylos F et al. (2020) A review of agent-based modeling of climate-energy policy. *Wiley Interdiscip Rev Clim Change* 11. <https://doi.org/10.1002/wcc.647>
- Cihon, T. M., & Mattaini, M. A. (Eds.). (2020). *Behavior Science Perspectives on Culture and Community*. Association for Behavior Analysis International.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1007/978-3-030-45421-0>
- Cischinsky, H.; Diefenbach, N.; Rodenfels, M. (2018): Datenerhebung Wohngebäudebestand 2016. Anleitung zur Durchführung von Auswertungen mit der Auswertungsdatenbank
- Claudy, M. C., Michelsen, C. & O'Driscoll, A. (2011). The diffusion of microgeneration technologies – assessing the influence of perceived product characteristics on home owners' willingness to pay. *Energy Policy*, 39(3), 1459–1469. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2010.12.018>
- Clausnitzer, K.-D.; Jahnke, M.; Rohde, C.; Steinbach, J. (2015): Datenerhebung Gebäudebestand – Erfassung von statistischen Basisdaten zum Nichtwohngebäudebestand und empirische Analyse der energetischen Qualität ausgewählter Gebäudetypen. Band II: Mengengerüst Nichtwohngebäude und energetische Eigenschaften
- Deffuant G, Amblard F, Weisbuch G et al. (2002) How can extremism prevail? A study based on the relative agreement interaction model. *Journal of Artificial Societies and Social Simulation*
- Deutsche Energie-Agentur (Hrsg.) (dena, 2021) „DENA-GEBÄUDEREPORT 2022. Zahlen, Daten, Fakten.“
- Deutsche Energie-Agentur (Hrsg.) (dena, 2017). „Szenarien für eine marktwirtschaftliche Klima- und Ressourcenschutzpolitik 2050 im Gebäudesektor.“
- Diefenbach, N.; Cischinsky, H.; Rodenfels, M.; Clausnitzer, K.-D. (2010): Datenbasis Gebäudebestand - Datenerhebung zur energetischen Qualität und zu den

- Modernisierungstrends im deutschen Wohngebäudebestand. Darmstadt: Institut Wohnen und Umwelt (IWU)
- Droste-Franke, B.; Fohr, G.; Voge, M.; Nietgen, T.; van Doren, D.; Weidle, M.; O’Sullivan, M.; Deissenroth, M.; Nitsch, F.; Jacqué, K. (2020): Simulation von Innovationsdynamiken neuer Schlüsseltechnologien im Energiebereich am Beispiel von Lithium-Batterien, final report. Bad Neuenahr-Ahrweiler: IQIB GmbH
- Fais, B. (2015): Modelling policy instruments in energy system models – the example of renewable electricity generation in Germany, IER Forschungsberichte, Band 121
- Fishbein M, Ajzen I (1975) Belief, attitude, intention and behavior: An introduction to theory and research. Addison-Wesley series in social psychology. Addison-Wesley, Reading, Mass.
- Gebäudeforum klimaneutral 2022. (n.d.). Zahlen, Daten und Fakten zum Gebäudesektor. Gebäudeforum klimaneutral. Retrieved April 1, 2022, from <https://www.gebaeudeforum.de/wissen/zahlen-daten/>
- Gilbert, N.; Ahrweiler, P.; Pyka, A. (2010): The SKIN (Simulating Knowledge Dynamics in Innovation Networks) model. University of Surrey, University College Dublin, University of Hohenheim
- Glenn, S. S. (1991). Contingencies and metacontingencies: Relations among behavioral, cultural, and biological evolution. In P. A. Lamal (Ed.), Behavioral analysis of societies and cultural practices. Hemisphere Publishing Corporation. <https://books.google.com/books?hl=en&lr=&id=NTCa6mX1FZgC&pgis=1>
- Haasz, T. (2017): Entwicklung von Methoden zur Abbildung von Demand Side Management in einem optimierenden Energiesystemmodell – Fallbeispiele für Deutschland in den Sektoren Industrie, Gewerbe, Handel, Dienstleistungen und Haushalte, IER Forschungsberichte, Band 131
- Hekkert, M. P., Suurs, R. A., Negro, S. O., Kuhlmann, S. & Smits, R. E (2007). Functions of innovation systems: A new approach for analysing technological change. Technological forecasting and social change 74, 413–432. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0040162506000564>
- Hekkert, M., Negro, S., Heimeriks, G. & Harmsen, R. (2011). Technological innovation system analysis: A manual for analysts. Utrecht, NL. <https://www.semanticscholar.org/paper/Technological-Innovation-System-Analysis-A-manual-Hekkert-Negro/68e1abecbbe0da073c7e63d95dbb750f5d910024?p2df>
- Hauber, A. B., González, J. M., Groothuis-Oudshoorn, C. G. M., Prior, T., Marshall, D. A., Cunningham, C., IJzerman, M. J. & Bridges, J. F. P. (2016). Statistical Methods for the Analysis of Discrete Choice Experiments: A Report of the ISPOR Conjoint Analysis Good Research Practices Task Force. Value in health : the journal of the International Society for Pharmacoeconomics and Outcomes Research, 19(4), 300–315. <https://doi.org/10.1016/j.jval.2016.04.004>
- Huber, J., & Zwerina, K. (1996). The Importance of Utility Balance in Efficient Choice Designs. Journal of Marketing Research, 33(3), 307–317. <https://doi.org/10.1177/002224379603300305>
- IWU et al (2020): Forschungsdatenbank Nichtwohngebäude (dataNWG). www.dataNWG.de
- Glenn, S. S., Malott, M. E., Andery, M. A. P. A., Benvenuti, M., Houmanfar, R. A., Sandaker, I., Todorov, J. C., Tourinho, E. Z., & Vasconcelos, L. A. (2016). Toward Consistent Terminology

- in a Behaviorist Approach to Cultural Analysis. *Behavior and Social Issues*, 25(1), 11–27. <https://doi.org/10.5210/bsi.v25i0.6634>
- Konc T, Drews S, Savin I et al. (2022) Co-dynamics of climate policy stringency and public support. *Global Environmental Change* 74:102528. <https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2022.102528>
- Kranzl, I.; Anagnostopoulos, F.; Aichinger, E.; Müller, A.; Staniaszek, D.; Steinbach, J.; Toleikyte, A (2016): Energy Saving Cost Curves for the Case of the German Building Stock. In: 14. Symposium Energieinnovation an der Technischen Universität Graz. Graz, Austria. Retrieved (<https://www.tugraz.at/events/eninnov/nachlese/download-beitrag/stream-f/#c36892>)
- Kranzl, L.; Hummel, M.; Müller, A.; Steinbach, J. (2013): Renewable heating: perspectives and the impact of policy instruments. In: *Energy Policy* 59, pp. 44–58. Retrieved June 10, 2013 (<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0301421513002280>)
- Kranzl, L., Müller, A., Maia, I., Büchele, R., & Hartner, M. (2018). *Wärmezukunft 2050. Erfordernisse und Konsequenzen der Dekarbonisierung von Raumwärme und Warmwasserbereitstellung in Österreich*. https://eeg.tuwien.ac.at/fileadmin/user_upload/projects/import-downloads/PR_469_Waermewende_finalreport.pdf
- Mayring, P. (2010). *Qualitative Inhaltsanalyse: Grundlagen und Techniken* (11., aktua). Beltz. <https://katalog.ub.tu-braunschweig.de/vufind/Record/626245915>
- Mayring, P. (2017). *Qualitative Inhaltsanalyse in der psychologischen Forschung*. In *Handbuch Qualitative Forschung in der Psychologie* (pp. 1–17). Springer Fachmedien Wiesbaden. https://doi.org/10.1007/978-3-658-18387-5_52-1
- McPherson M, Smith-Lovin L, Cook JM (2001) Birds of a Feather: Homophily in Social Networks. *Annu Rev Sociol* 27:415–444. <https://doi.org/10.1146/annurev.soc.27.1.415>
- Michelsen, C. C. & Madlener, R. (2012). Homeowners' preferences for adopting innovative residential heating systems: A discrete choice analysis for Germany. *Energy Economics*, 34(5), 1271–1283. <https://doi.org/10.1016/j.eneco.2012.06.009>
- Michelsen, C. C. & Madlener, R. (2013). Motivational factors influencing the homeowners' decisions between residential heating systems: An empirical analysis for Germany. *Energy Policy*, 57, 221–233. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2013.01.045>
- Müller, A. (2015): *Energy Demand Assessment for Space Conditioning and Domestic Hot Water: A Case Study for the Austrian Building Stock*. Wien: Technische Universität Wien.
- Rädiker, S., & Kuckartz, U. (2019). *Analyse qualitativer Daten mit MAXQDA*. Springer Fachmedien Wiesbaden. <https://doi.org/10.1007/978-3-658-22095-2>
- Remme, U. (2006): *Zukünftige Rolle erneuerbarer Energien in Deutschland: Sensitivitätsanalysen mit einem linearen Optimierungsmodell*, IER Forschungsberichte, Band 99
- Revelt, D. & Train, K. (1998). Mixed Logit with Repeated Choices: Households' Choices of Appliance Efficiency Level. *The Review of Economics and Statistics*, 80(4), 647–657. <http://www.jstor.org/stable/2646846>
- Robinson, O. C. (2014). Sampling in Interview-Based Qualitative Research: A Theoretical and Practical Guide. *Qualitative Research in Psychology*, 11(1), 25–41 <https://doi.org/10.1080/14780887.2013.801543>
- Scarpa, R. & Willis, K. (2010). Willingness-to-pay for renewable energy: Primary and discretionary choice of British households' for micro-generation technologies. *Energy Economics*, 32(1), 129–136. <https://doi.org/10.1016/j.eneco.2009.06.00>

- Schlomann, BB.; Steinbach, J.; Kleeberger, H.; Geiger, B.; Pich, A.; Gruber, E.; Mai, M.; Schiller, W.; Gerspacher, A. (2014): Energieverbrauch des Sektors Gewerbe, Handel, Dienstleistungen (GHD) für die Jahre 2004 bis 2006. Stuttgart: Fraunhofer-Verlag. Retrieved (<https://portal.dnb.de/opac.htm?method=simpleSearch&cqlMode=true&query=idn%3D1049801253>)
- Schmitt, D. R. (1987). INTERPERSONAL CONTINGENCIES: PERFORMANCE DIFFERENCES AND COST-EFFECTIVENESS. *Journal of the Experimental Analysis of Behavior*, 48(2), 221–234. <https://doi.org/10.1901/jeab.1987.48-221>
- Senkpiel, C., Dobbins, A., Kockel, C., Steinbach, J., Fahl, U., Wille, F., Globisch, J., Wassermann, S., Droste-Franke, B., Hauser, W., Hofer, C., Nolting, L., Bernath, C. (2020): Integrating Methods and Empirical Findings from Social and Behavioural Sciences into Energy System Models—Motivation and Possible Approaches. In: *Energies* 13, 4951. <https://doi.org/10.3390/en13184951>
- Skinner, B. F. (1981). Selection by Consequences. *Science*, 213(4507), 501–504. <https://doi.org/10.1126/science.7244649>
- Steinbach, J. (2015): Modellbasierte Untersuchung von Politikinstrumenten zur Förderung erneuerbarer Energien und Energieeffizienz im Gebäudebereich. Edited by Fraunhofer ISI. Stuttgart: Fraunhofer Verlag. Retrieved (<https://www.verlag.fraunhofer.de/bookshop/buch/Modellbasierte-Untersuchung-von-Politikinstrumenten-zur-Förderung-erneuerbarer-Energien-und-Energieeffizienz-im-Gebäudebereich/245046>)

A.1 Annex – Modellbeschreibungen

A.1.1 Modellbeschreibung PANDORA⁸

Agenten-basierte Modellierung wird häufig verwendet, um die Auswirkungen von Politikmaßnahmen auf die Verbreitung von Technologien zu analysieren. Solche Modelle können verwendet werden, um die Rolle der sozialen Akzeptanz erneuerbarer Energietechnologien oder -systeme bei der Bewertung von Politiken (Castro, 2020). Weniger Aufmerksamkeit wurde jedoch der Akzeptanz politischer Maßnahmen gewidmet, die den Einsatz erneuerbarer Technologien fördern können. Darüber hinaus berücksichtigen nur wenige ABMs die Dimension der politischen Akzeptanz im Zusammenhang mit Klima und Energie (Konc, 2022).

Analog zur empirischen Datenerhebung und -analyse wurde im Projekt Manifold ein agentenbasiertes Modell entwickelt, um zu untersuchen, wie der gesellschaftliche Akzeptanzprozess in einem agentenbasierten Modell formalisiert werden könnte. Der Modellrahmen umfasst zwei Dimensionen des Akzeptanzprozesses von Akteuren gegenüber einer neu eingeführten Politikmaßnahme: die Einstellungsbildung des einzelnen Akteurs und die Kommunikation innerhalb des sozialen Netzwerks durch den Meinungsaustausch über die Wahrnehmung der Politik, die sich auf die Meinungsbildung auswirkt.

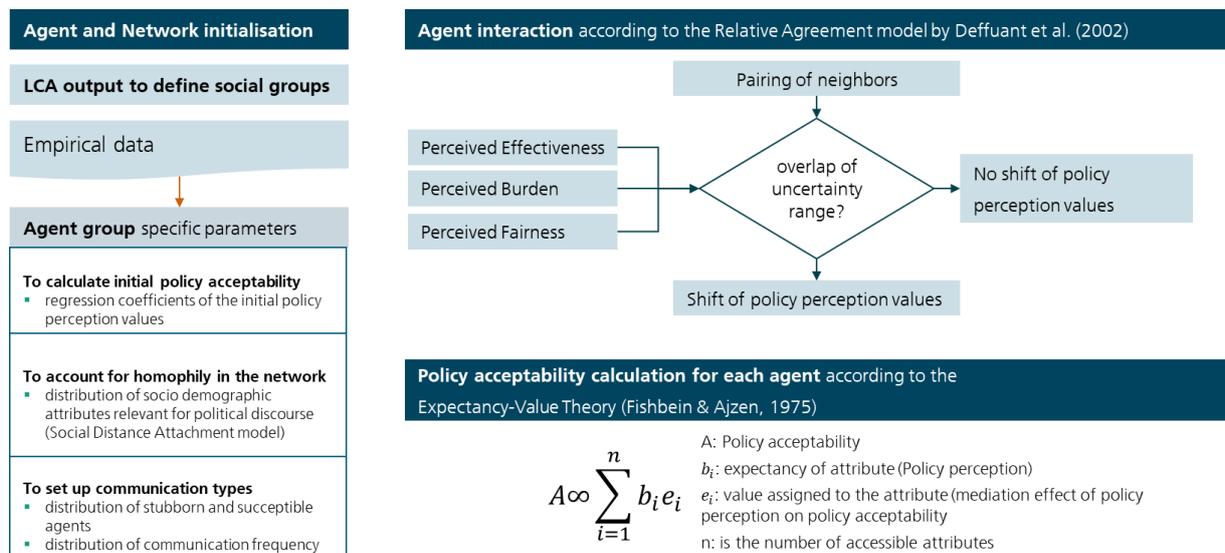
Den Kern des Modells bilden individuelle Agenten, die die statistische Verteilung der Individuen in der deutschen Gesellschaft auf der Grundlage der Ergebnisse der durchgeführten empirischen Erhebung repräsentieren. Ziel des Modells ist es nicht, empirisch beobachtbare Daten zu imitieren, sondern mögliche Pfade aufzudecken, die die gesellschaftliche Akzeptanz einer neu eingeführten Politikmaßnahme unter Berücksichtigung der Effekte eines öffentlichen politischen Diskurses nehmen könnte. Zukünftige Iterationen des Modells werden auch den Einfluss von Medien und sektorrelevanten institutionellen Akteuren einbeziehen. Darüber hinaus ermöglicht das Modell das Testen verschiedener politischer Szenarien im Wärmesektor.

Innerhalb des Projektes wird das Modell PANDORA (Policy Acceptance, Diffusion of Opinions and Relations among Actors) dazu verwendet wie die Dynamik des politischen Akzeptanzprozesses in verschiedenen Politikszenerarien zu untersuchen, die auf den Wärmesektor abzielen. Die politischen Szenarien unterscheiden sich in ihrem Grad an Rigorosität, d.h. sie könnten entweder kohlenstoffarme Heiztechnologien durch die Einführung unterschiedlich hoher Kohlenstoffsteuern unterstützen oder Verbote für fossile Brennstofftechnologien anwenden. Zukünftig könnte der PANDORA-Output mit techno-ökonomischen Modellen kombiniert werden, um die Ungewissheit in Bezug auf die Akzeptanz der öffentlichen Politik zu integrieren.

Jeder einzelne Agent ist eine Repräsentation eines diskreten Individuums mit einer Reihe von Attributen, einer Fähigkeit zur Einstellungsbildung und einem Kommunikationsverhalten. Die Agenten interagieren innerhalb der Modellumgebung, die die Agenten über einen Netzwerkgraphen miteinander verbindet und Zustandsvariablen speichert. Auf der Grundlage ihres Meinungsaustauschs mit anderen Agenten im Netzwerk über ihre Wahrnehmungsfaktoren haben sie die Möglichkeit, ihre Einstellung zur Politik zu ändern. Unter der Annahme, dass die Mitglieder jeder sozialen Gruppe eine ähnliche anfängliche Einstellung zu einem politischen Szenario haben, führen die Interaktionen im sozialen Netzwerk im Laufe des Modells zu Veränderungen in der Einstellung der einzelnen Agenten. Einen Überblick über die Modellkomponenten und Modellannahmen zeigt Abbildung 23.

⁸ Quelle: Pröpfer et al. (2023) Konferenzbeitrag auf der Social Simulation Conference Glasgow 2023

Abbildung 23: Struktur des Modells PANDORA



Modellinitialisierung

Zunächst wird das PolitikszENARIO definiert. Anschließend werden die kritischen Parameter für das Modell konfiguriert, wie z. B. die Anzahl der Agenten, die Simulationsschritte, die netzspezifischen Merkmale und die Parameter des Kommunikationsmodells. Jeder einzelne Agent gehört zu einer sozialen Gruppe, die die Anfangswerte der Attribute der Politikwahrnehmung und die gruppenspezifischen Gewichte bestimmt, um die Einstellung des Agenten zu berechnen. Dabei wird davon ausgegangen, dass Mitglieder der gleichen sozialen Gruppe eine ähnliche Einstellungsbildung gegenüber einer Politik aufweisen würden. Die Eigenschaften sozialer Gruppen werden aus einer vorherigen Analyse (Latent Class Analysis) empirischer Daten siehe (2.3.1) unter Verwendung von Regressionskoeffizienten und Verteilungen abgeleitet und beschrieben. Innerhalb jeder Gruppe werden Agenten in drei Kategorien unterteilt, die jeweils eine „extreme“, „moderate“ oder „gemäßigte“ Position im Diskurs einnehmen. Die Verteilungen dieser drei Akteurstypen pro Gruppe werden aus den empirischen Daten ermittelt und als Wahrscheinlichkeiten für die Initialisierung der einzelnen Agenten verwendet. Die Zahl N der Akteure ist durch ein soziales Netzwerk verbunden. Die Bildung sozialer Netzwerke und ihre Struktur werden maßgeblich von einem Prinzip beeinflusst, das als Homophilie bekannt ist, einem sozialen Selektionseffekt, der die Entwicklung sozialer Bindungen auf der Grundlage gemeinsamer soziodemografischer Merkmale vorhersagt (McPherson, 2001). Um Homophilie in politischen Diskussionsnetzwerken zu berücksichtigen, verwenden wir ein (heterogenes) Watts-Strogatz-Kleinweltenetzwerk. Zunächst wird das Netzwerk mit Hilfe des Watts-Strogatz Netzwerks initialisiert, bei dem jeder Agent mit seinen k nächsten Nachbarn in einer Ringgitterstruktur verbunden ist. Im zweiten Schritt wird das Social Distance Attachment (SDA)-Modell (Boguna, 2004) verwendet, um das Watts-Strogatz-Netzwerk neu zu konfigurieren. Das SDA-Modell ist ein theoretischer Ansatz, der erklärt, wie Individuen auf der Grundlage ihrer sozialen Distanz Beziehungen aufbauen. Dieser Ansatz stellt sicher, dass Agenten mit einer höheren Wahrscheinlichkeit miteinander im Netzwerk verbunden werden, wenn sie ähnliche soziodemografische Faktoren aufweisen, aber trotzdem die Eigenschaften eines Watts-Strogatz-Netzwerks erhalten bleiben.

Kommunikationsprozess und Meinungsformierung

Eine Möglichkeit, die Interaktion und den sozialen Einfluss innerhalb eines sozialen Netzwerks zu beschreiben, ist das Relative Agreement (RA) (Deffuant, 2020). Das RA-Modell versucht, die Meinungsbildung und Konvergenz in einem Netzwerk von Individuen mit unterschiedlichen Meinungen zu simulieren. Im RA-Modell werden die Agenten nach dem Zufallsprinzip für die Interaktion gepaart. Bei jeder Interaktion tauschen beide Agenten ihre Meinungen aus und revidieren sie auf der Grundlage der Meinung des anderen. Bei jeder Interaktion wird ein vorher festgelegter Unsicherheitsbereich als Schwellenwert verwendet. Wenn die Differenz zwischen den Meinungen zweier interagierender Individuen kleiner als ein Schwellenwert ist, nähern sie sich an, was zu einer Konvergenz ihrer Meinungen führt. Ist der Unterschied zwischen den Meinungen der Individuen hingegen größer als der Schwellenwert, kommt es zu keiner Änderung der Meinungen. Eine weitere Annahme im Modell ist, dass Individuen in einem persönlichen Austausch eher dazu neigen, die Gründe für ihre Zustimmung oder Ablehnung einer politischen Maßnahme zu artikulieren, als einfach nur ihre allgemeine Einstellung gegenüber der politischen Maßnahme zu äußern. In PANDORA teilt jeder Agent seine Meinung zu einer politischen Maßnahme mit, die aus den Attributen "Effektivität", "Fairness" und "Persönliche Belastung" (kontinuierliche Werte zwischen -1 und 1) besteht, und vergleicht seine Attribute mit denen seines Gegenübers. Die Hypothese hinter dieser Annahme ist, dass die Akzeptanz der Politik im Wärmesektor durch Attribute der Politikwahrnehmung vermittelt wird. Um eine Verbindung zwischen diesen Attributen der Politikwahrnehmung und der Einstellungsbildung herzustellen, verwenden wir die Expectancy-Value (EV) Theorie (Fishbein u. Ajzen, 1975). Die EV-Theorie ist ein weit verbreitetes psychologisches Erklärungsmodell dafür, wie Individuen Einstellungen gegenüber einem Objekt bilden. Als Ergebnis der Interaktion zwischen den Agenten wird schließlich der Akzeptanzwert jedes Agenten gemäß der Formel der EV-Theorie neu berechnet.

A.1.2 Modellbeschreibung SKIN

Das Modell SKIN (Simulating Knowledge in Innovation Networks)-Energy, das im Projekt verwendet wird, basiert auf dem SKIN-Basismodell von Gilbert et al. (2010). SKIN wurde bereits vielfach im Kontext der Innovationsforschung in Unternehmensnetzwerken angewandt und stellt ein anerkanntes Verfahren in diesem Bereich dar. Mit SKIN-Energy wurde das Modell um einige Funktionalitäten erweitert, um es konkreter auf Technologieinnovationsprozesse anzupassen (vgl. Droste-Franke et al. 2020).

Wissensgenese und Wissensaustausch sind zentrale Elemente von SKIN. In dem agentenbasierten Modell interagieren Agenten mit heterogenen Eigenschaften in einer sich kontinuierlich verändernden Umgebung. Agenten im Modell sind vor allem Firmen und Forschungsinstitutionen, zum Beispiel im Bereich der Entwicklung von Wärmepumpen. Firmen produzieren und verkaufen innovative Güter, wie Wärmepumpen oder deren Vorprodukte. Dazu benötigen sie Wissen und Inputs von anderen Agenten. Dies umfasst Wissen aus Forschung und Entwicklung anderer Firmen und Forschungsinstitute, aber auch praktisches Wissen für eine effiziente Produktion und über benötigte Vorprodukte bzw. Ressourcen. Durch Forschung und Produktionskooperation können Firmen entsprechendes Wissen generieren. So können Wärmepumpen durch den Einsatz neuer Materialien oder eines neuen Designs effizienter gestaltet werden. Forschungsinstitutionen forschen dabei in geförderten Projekten, vermehren so ihr Wissen und tauschen es unter anderem mit Firmen als Projektpartner aus. Findet eine Wärmepumpe keinen Absatz, senkt die Firma den Preis. Das Modell SKIN-Energy enthält zusätzlich zum Basismodell folgende wesentlichen Aspekte, die für typische Fragen im Energiebereich wichtig sind: Zur Darstellung des Wissens wird eine Mengendarstellung verwendet, die Berechnung der Expertise von Agenten und Qualität von Produkten ist wesentlich

verfeinert, Prozesse öffentlicher Förderung von Forschungsprojekten sind abgebildet, Start-up-Prozesse werden differenziert implementiert, große Firmen und Konglomerate sind abbildbar, der Produktraum ist stärker in Richtung Wertschöpfungskette strukturiert, Produktmengen werden modelliert und Produktcharakteristiken sowie Märkte werden spezifisch abgebildet.

Um die Auswirkungen von Maßnahmen auf Struktur und Dynamik von Innovationsnetzwerken zu analysieren, werden diese im Rahmen von Simulationsexperimenten in SKIN implementiert. Maßnahmen können dabei direkt darauf abzielen, bestimmte Funktionalitäten eines Innovationssystems zu verbessern. Eine Maßnahme könnte es zum Beispiel sein, die Zusammenarbeit und Kommunikation entlang der Wertschöpfungskette (zum Beispiel zwischen Wärmepumpenherstellern und den Zulieferern) bzw. quer dazu (zum Beispiel unter bestimmten Zulieferern) und damit den Wissensaustausch zwischen den jeweiligen Akteuren zu verstärken.

A.1.3 Modellbeschreibung INVERT

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. Grundlage des Modells ist eine detaillierte Darstellung des Gebäudebestands nach Gebäudetypen, Baualtersklassen und Sanierungszuständen mit relevanten bauphysikalischen und ökonomischen Parametern einschließlich der Technologien zur Bereitstellung von Raumwärme, Warmwasser und Klimatisierung. Darauf aufbauend wird der Heiz- und Kühlenergiebedarf unter Einbeziehung von Nutzerverhalten und Klimadaten ermittelt. Die Investitionsentscheidung in Technologien und Effizienzmaßnahmen wird unter Berücksichtigung von investorenspezifischen Entscheidungskalkülen und Hemmnissen sowie Energieträgerpotenzialen im Modul INVERT-Agents ermittelt (vgl. Kranzl et al. 2013; Müller und Biermayer 2011; Steinbach 2013).

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. Im Rahmen des laufenden Forschungsprojektes *Diffusion EE* wird das Modell um den Bereich der Intermediäre als zentrale Change Agents erweitert, um den Einfluss auf die Investitionsentscheidung im Gebäudebereich abzubilden.

Für eine realitätsnahe Simulation des Einsatzes erneuerbarer Energien im Gebäudebereich werden unter anderem folgende relevante Zusammenhänge im Modell abgebildet:

Berücksichtigung von investorenspezifischen Hemmnissen und Kalkülen bei der Investitionsentscheidung in Wärmeversorgungssysteme und Effizienzmaßnahmen.

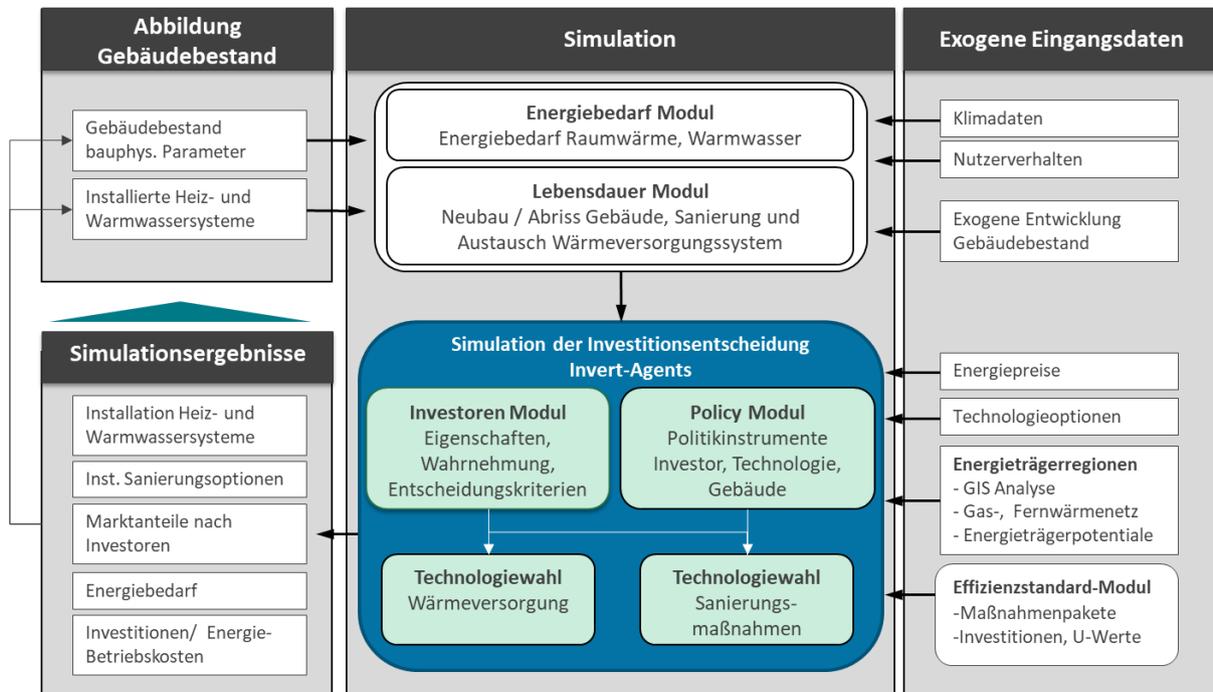
Das Temperaturniveau des Wärmeverteilungssystems wird in der Simulation berücksichtigt, besonders die Interaktion zwischen diesem und den Wirkungsgraden bzw. Arbeitszahlen der Bereitstellungstechnologien. Dies ist in besonderem Maße für eine realitätsnahe Simulation des Einsatzes von Wärmepumpen in älteren Gebäuden von Bedeutung.

Die Modellierung der Energiebereitstellung aus solarthermischen Anlagen erfolgt auf monatlicher Basis unter Berücksichtigung der entsprechenden solaren Einstrahlung. Zudem wird die entsprechend der Geometrie der Referenzgebäude den solarthermischen Anlagen zur Verfügung stehende Dachfläche im Modell berücksichtigt.

Politikinstrumente zur Förderung von EE-Wärme und Effizienzmaßnahmen wie Investitionszuschüsse (Marktanreizprogramm), Nutzungspflichten (EEWärmeG) oder haushaltsunabhängige Umlagesysteme werden technologie- und gebäudespezifisch (Neubau, Bestand, öffentliche Gebäude) definiert.

Darüber hinaus erfolgt eine Berücksichtigung der Limitierung erneuerbarer Energieträger über definierte Kostenpotenziale inklusive deren Entwicklung über den Simulationszeitraum.

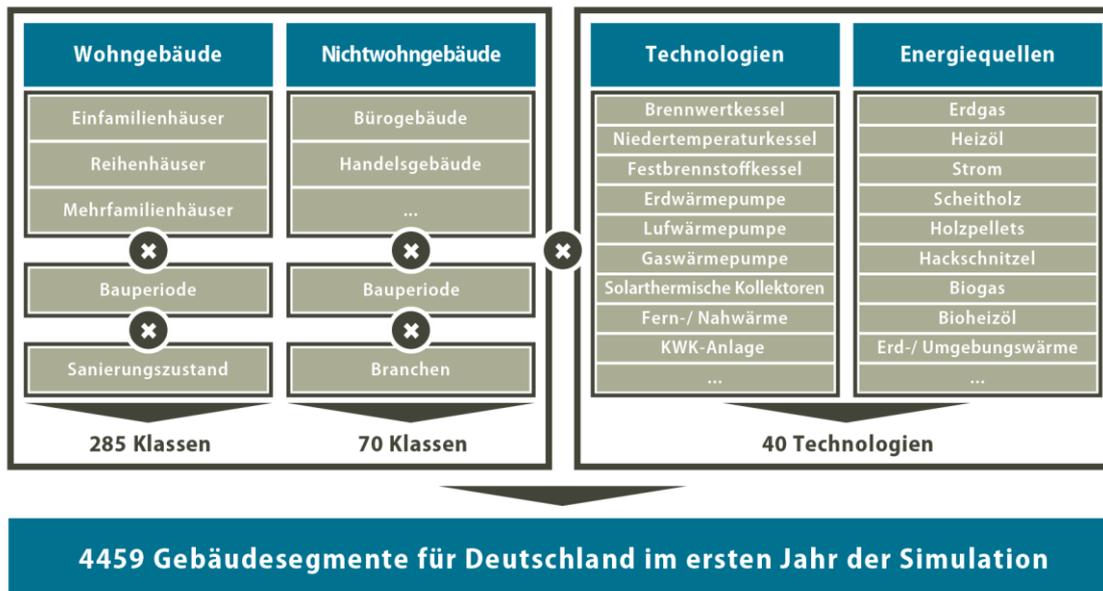
Abbildung 24: Struktur des Simulationsmodells Invert/EE-Lab (Quelle: Steinbach 2015)



Gebäudetypologische Abbildung von Referenzgebäuden und Wärmeversorgungstechnologien

Derzeit werden 40 verschiedene Technologien zur Bereitstellung von Raumwärme und Warmwasser unterschieden, welche über detaillierte technische und ökonomische Daten abgebildet werden. Die Referenzgebäudetypologie mit den entsprechenden Zuordnungen von Gebäuden und Technologien wird auf Basis der Erhebungen „Datenbasis Wohngebäude“ (Diefenbach et al. 2010) und deren Aktualisierung aus dem Jahr 2018 (Cischinsky und Diefenbach 2018) vorgenommen. Die Gebäudetypologie von Nichtwohngebäuden basiert ursprünglich auf der Studie „Energieverbrauch im Sektor Gewerbe, Handel, Dienstleistungen“ (Fraunhofer ISI et al. 2013) und wird derzeit mit den Daten aus dem Projekt dataNWG: Forschungsdatenbank Nichtwohngebäude (<https://www.datanwg.de>) aktualisiert. Der aus der Modellrechnung resultierende Energiebedarf ist auf die temperaturbereinigten Werte der Anwendungsbilanzen sowie der EE-Wärmebereitstellung nach AGEE-Stat kalibriert.

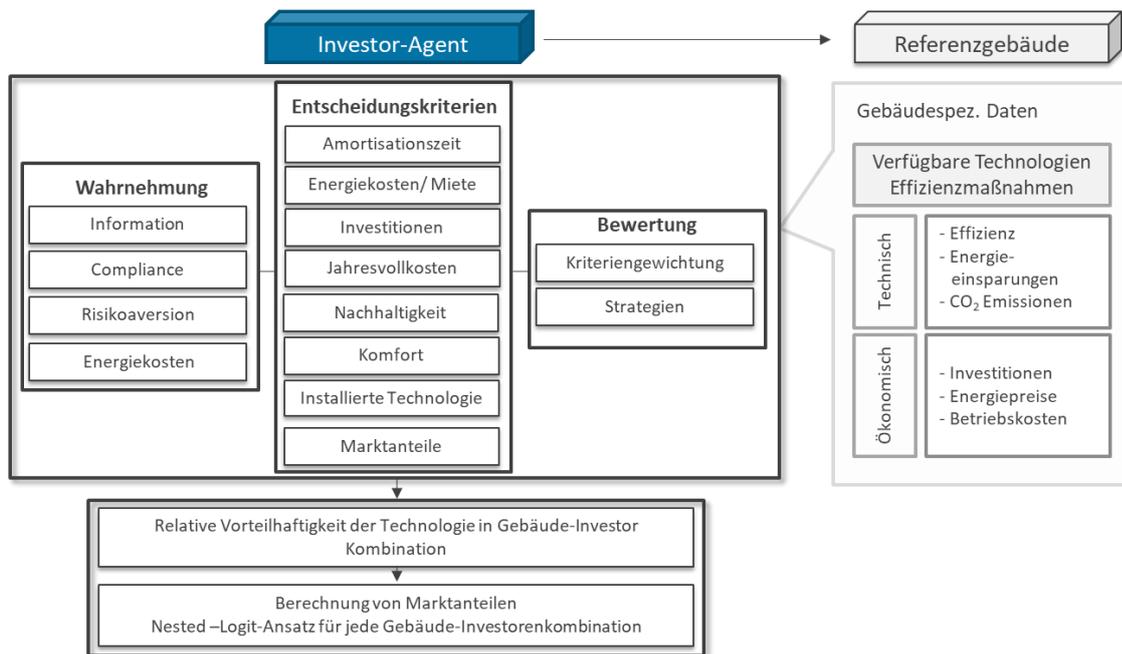
Abbildung 25: Struktur der hinterlegten Gebäudetypologie in Invert/ EE-Lab



Modellierung von Investoren im Gebäudebereich

Im Modell können einzelne Investorentypen implementiert werden, welche den Referenzgebäudesegmenten anteilig als Besitzer zugeordnet werden. Diese Anteile sind zeitabhängig und können somit exogen über den Simulationszeitraum verändert werden. Das Modell erlaubt die Definition beliebig vieler Investorenagenten, welche jeweils Instanzen einer von fünf möglichen Agentenklassen darstellen – *Selbstnutzende Eigentümer*, *Private Vermieter*, *Eigentümergeinschaften*, *Wohnungsbaugesellschaften*, *gewerbliche Gebäudebesitzer*. Als Grundlage der Investitionsentscheidung werden verschiedene ökonomische und nichtökonomische Entscheidungskriterien definiert, die für jede Kombination von Investoren, Referenzgebäudesegmenten und Technologieoptionen individuell ermittelt werden. Die Eigenschaften einer Investoreninstanz werden als Eingangsdaten definiert, womit einerseits die Relevanz unterschiedlicher Entscheidungskriterien über Gewichte bestimmt werden, andererseits auch die Ausprägung der Kriterien beeinflusst werden. Somit wird sowohl die Art der Investitionsentscheidung – Berücksichtigung unterschiedlicher Kriterien – als auch die Wahrnehmung der Technologieoptionen und der damit verbundenen Parameterausprägungen unterschieden. Für jede zur Verfügung stehende Technologieoption werden in jedem Referenzgebäudesegment aus Sicht jeder Investoreninstanz Nutzwerte berechnet, auf deren Basis die Marktanteile mit einem *Nested-Logit-Modell* ermittelt werden.

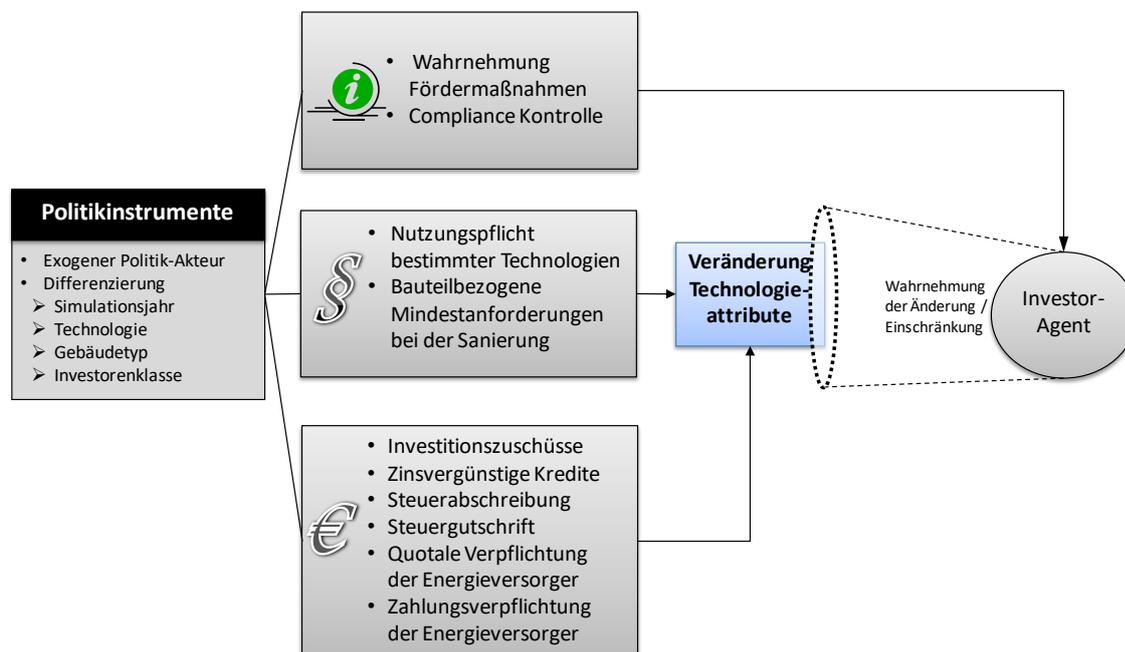
Abbildung 26: Modellierung der Gebäudeeigentümer als Investor-Agenten



Modellierung von Politikinstrumenten

Um die Wirkung der Politikinstrumente auf die Investitionsaktivität in Energieeffizienzmaßnahmen und Wärmeversorgungssysteme zu untersuchen, werden diese explizit im Modell abgebildet. Dies geschieht als integrale Modellierung von Politikinstrumenten und Investoren, die eine aktorenspezifische Untersuchung der Wirkungen der Instrumente ermöglichen sollen.

Abbildung 27: Schematische Darstellung der Modellierung von Politikinstrumente in Invert-Agents (Quelle: Steinbach, 2015)

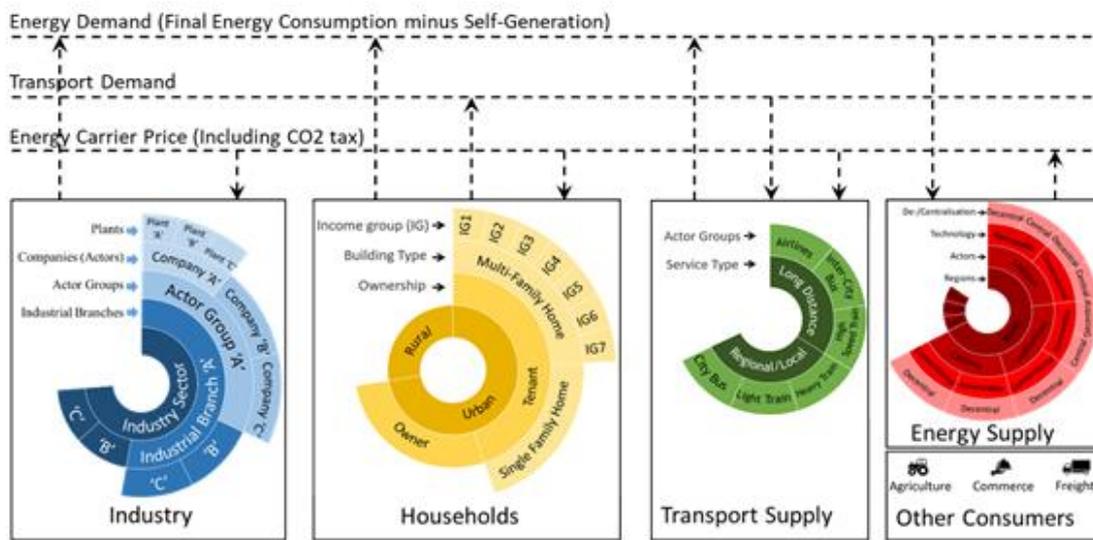


Die Politikinstrumente und deren Ausgestaltung werden zunächst aus Sicht eines Politik-Akteurs für jedes Simulationsjahr exogen definiert. Dabei werden Förder- und Anforderungsbedingungen nach den adressierten Technologien und Maßnahmen sowie den Adressaten – Investorenklassen und Gebäudetypen differenziert.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

A.1.4 Modellbeschreibung TAM

Das TIMES-Akteursmodell (TAM) basiert auf dem TIMES-Modellgenerator, beinhaltet aber die detailliertere Charakterisierung der verschiedenen Akteure innerhalb der Angebots- und Nachfragesektoren. TAM verwendet das gleiche Grundkonzept wie TIMES und zielt auf die Ermittlung der wirtschaftlich optimalen Struktur des Energiesystems bei einem vorgegebenen Nutzenergie- bzw. Energiedienstleistungsbedarf und ggf. energie- und umweltpolitischen Vorgaben. Die Komplexität des Modells wird jedoch durch die erhöhte Auflösung der verschiedenen Wirtschaftssektoren des Energiesystems erhöht: Energieversorgung, Industrie, Haushalte und Verkehr, während die restlichen Sektoren weiterhin aggregiert abgebildet sind, wie in Abbildung 26 dargestellt (Ahanchian et al. 2020).

Abbildung 28: Darstellung die abgebildeten Akteursgruppen in TAM (Quelle: Universität Stuttgart – IER)



Um die höhere Sektorauflösung zu ermöglichen, ohne die Rechenzeit des Modells unnötig zu erhöhen, werden die Sektoren in Einzelmodelle aufgeteilt und durch einen Kopplungsmechanismus verbunden, der durch Nachfragen aus den Nachfragesektoren und Preise für Energieträger aus dem Angebotssektor durch einen iterativen Prozess ermöglicht wird. Der TAM-Modellhorizont erstreckt sich von 2013 bis 2060 in jährlicher Auflösung mit 4 Regionen im Angebotssektor sowie jeweils eine Region auf Jahresbasis in den Nachfragesektoren. Die Eingaben in das Modell zielen darauf ab, die Versorgung der Nachfragesektoren mit Energiedienstleistungen zu minimalen globalen Kosten sicherzustellen, indem gleichzeitig Entscheidungen über Anlageninvestitionen und -betrieb, Primärenergieversorgung und Energiehandel für jede Region getroffen werden. Wenn beispielsweise die Energiedienstleistung für die Beleuchtung von Wohngebäuden im Vergleich zum Referenzszenario zunimmt (vielleicht aufgrund eines Rückgangs der Kosten für die Beleuchtung von Wohngebäuden oder aufgrund einer anderen Annahme für das Einkommenswachstum), müssen entweder die vorhandenen Erzeugungsanlagen intensiver genutzt oder neue, möglicherweise effizientere Anlagen installiert werden. Die Auswahl der Erzeugungsanlagen (Typ und Brennstoff) durch das Modell basiert auf der modellintegrierten vergleichenden Analyse der Eigenschaften alternativer Erzeugungstechnologien, auf der Wirtschaftlichkeit der Energieversorgung und auf Umweltkriterien.

TAM berücksichtigt auch Budgetrestriktionen, die die Investitionen auf das tatsächlich verfügbare Kapital für die definierten Akteursgruppen begrenzt. Diese methodischen Erweiterungen verbessern die Einschätzung der möglichen angebots- und nachfrageseitigen notwendigen Veränderungen. Das entwickelte und angewandte Verfahren der Modellkopplung bietet eine ganzheitliche Sicht auf ein integriertes Energiesystem in seiner Gesamtheit mit einer verbesserten Darstellung der Akteure, womit anwendbare innovative Lösungen zur Reduktion der Treibhausgas-(THG)Emissionen erarbeitet werden können, die für die verschiedenen Akteure innerhalb der verschiedenen Sektoren relevant sind. Die Methodik eignet sich auch dazu, die Herausforderungen bei der politischen Koordination zwischen ähnlichen Akteuren zu bewältigen und die Konsistenz bei der Modellanwendung zur Definition CO₂-armer Transformationspfade zu erhöhen. Hiermit können die Akteure unter Berücksichtigung ihrer nichttechnischen Entscheidungskriterien gezielter bezüglich der Investitionsentscheidungen angesprochen werden, was die Kostenwirksamkeit bei der Erreichung der Ziele der Energiewende deutlich steigern kann.

A.1.5 Modellbeschreibung ENERTILE

Das Modell ENERTILE ist ein am Fraunhofer ISI entwickeltes techno-ökonomisches Modell zur detaillierten Optimierung des Stromsystems und basiert auf der Methodik der linearen Optimierung. Das Modell konzentriert sich auf den Stromsektor, deckt aber auch die Wechselwirkungen mit anderen Sektoren (z. B. Wärme und Verkehr) ab. Es wird primär für Szenariostudien eingesetzt, um kostenminimale Entwicklungspfade zu ermitteln. Ein Fokus liegt auf der Analyse von Chancen und Herausforderungen bei steigenden Anteilen erneuerbarer Energien. Zur Integration erneuerbarer Energien wird zusätzliche Flexibilität innerhalb des Stromsektors oder auch eine stärkere Verknüpfung mit anderen Sektoren genutzt.

In Stromversorgungssystemen mit hohen Anteilen fluktuierender Erzeugung beeinflusst die Stochastik wetterabhängiger Wind- und Solarstromerzeugung die Auslegung des Systems signifikant. ENERTILE besitzt daher eine stündliche Auflösung und berechnet den kostenminimalen Erzeugungs- und Infrastrukturmix zu exogenen Strom- und Wärmenachfragen. Dazu wird sowohl der Ausbau als auch der Einsatz der fossilen und erneuerbaren Strom- und Wärmeerzeuger, der Stromnetze und der Energiespeicher optimiert. Der hohe Detailgrad in der Darstellung der erneuerbaren Energien ist eine zentrale Stärke des Modells.

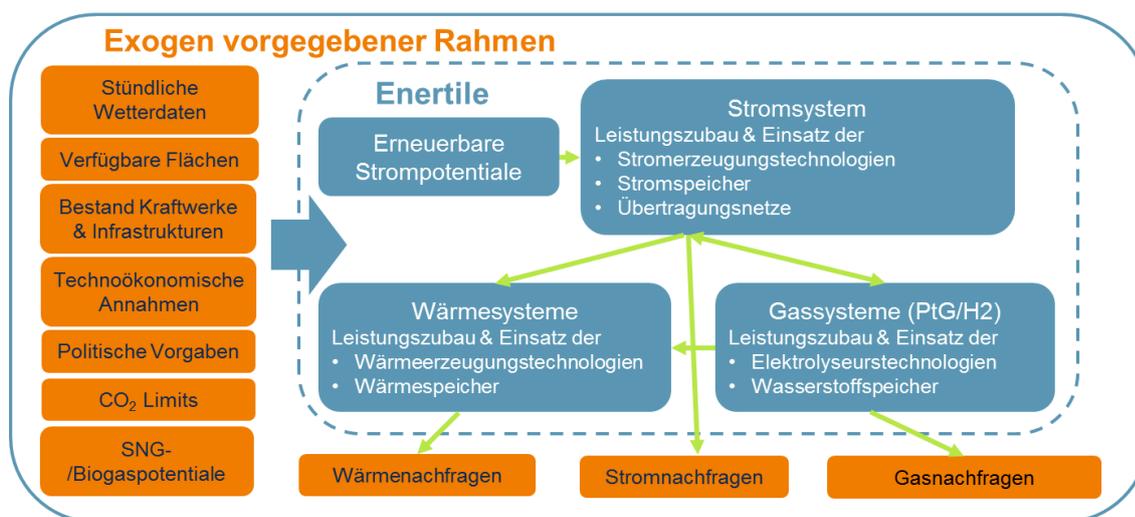
Zu den derzeit modellierten Regionen gehören die Mitgliedsstaaten der Europäischen Union, das Vereinigte Königreich, die Schweiz, Norwegen, der Balkan und die Staaten der MENA-Region (Mittlerer Osten und Nordafrika). Die regionale Auflösung unterscheidet sich nach den betrachteten Aspekten. Während die Potenziale erneuerbarer Energien auf einem sehr feinen Flächengitter über die gesamte modellierte Region abgebildet werden, werden andere Aspekte, wie beispielsweise Energienachfragen, auf größere, zusammenhängende Modellregionen aggregiert, die sich an Netzengpässen im Stromübertragungsnetz und den Nationalstaaten orientieren. Innerhalb einer Modellregion findet innerhalb eines Modelllaufs keine weitere regionale Differenzierung statt.

Das lineare Optimierungsproblem wird typischerweise für die Stützjahre 2030, 2040, und 2050 in stündlicher Auflösung aufgestellt und gelöst. Dabei werden der Ausbau und der Einsatz der Infrastrukturen über alle Stützjahre unter perfekter Voraussicht in einem einzigen Modelllauf gemeinsam optimiert. Dies bedeutet, dass das Modell die Folgen einer Entscheidung im Jahr 2030 in den Folgestützjahren berücksichtigen muss. So wird gewährleistet, dass die Wechselwirkungen und Komplementaritäten zwischen Systemkomponenten voll erfasst werden und der für den gesamten Zeitraum kostenminimale Erzeugungs-, Übertragungs- und Speichermix bestimmt wird.

Die Deckung der exogenen und endogenen Nachfragen nach Strom, Wärme in Wärmenetzen und erneuerbaren Gasen in jeder Stunde eines Jahres wird über die zentralen Nebenbedingungen der Optimierung sichergestellt. Für jede Modellregion und jeden betrachteten Energieträger wird eine stundenscharfe Bilanzgleichung aufgestellt, die ausgeglichen sein muss. So müssen beispielsweise Stromangebot und -nachfrage für eine modellierte Region in jeder Stunde synchronisiert sein. Sektorenkopplungsoptionen, Energiespeicher und Netze schaffen Verbindungen zwischen einzelnen Bilanzgleichungen. Sektorenkopplungstechnologien wie beispielsweise Elektroheizkessel gehen mit unterschiedlichen Vorzeichen in der Strom- und Wärmebilanzgleichung einer Region in einer bestimmten Stunde ein. Speicher schaffen intertemporale Verbindungen zwischen den Bilanzgleichungen eines Energieträgers für unterschiedliche Stunden. Übertragungsstromnetze werden durch die Verknüpfung der Strombilanzräume unterschiedlicher Regionen für einen Zeitpunkt realisiert. Somit kann ENERTILE im Rahmen der Optimierung ein sehr detailliertes Abbild der gegenseitigen Abhängigkeiten bei der Optimierung des gesamten angebotsseitigen Energiesystems liefern.

Die Modellierung des Wärmesektors in ENERTILE umfasst dezentrale Wärmepumpen sowie Wärmenetze mit multivalenter Wärmeerzeugung. Der durch Wärmepumpen und in Wärmenetzen gedeckte Wärmebedarf wird exogen vorgegeben. Diese Vorgaben basieren beispielsweise auf Ergebnissen des Modells Invert/EE-Lab. Ein dezentrales Wärmepumpensystem besteht aus einem Gebäude mit einem definierten Wärmebedarf, einer Wärmepumpe und einem Wärmespeicher. Die Deckung der Stromnachfrage ist ebenso wie die Verlagerung der Stromnachfrage der Wärmepumpen mithilfe des Wärmespeichers Teil des Optimierungsproblems. Für die Deckung des Wärmebedarfs in Wärmenetzen stehen Kraft-Wärme-Kopplungsanlagen (KWK), Gaskessel, Elektrokessel, Großwärmepumpen und Wärmespeicher zur Verfügung. Die Investition und der Einsatz der Wärmeerzeugungstechnologien in Wärmenetzen ist direkt in die Systemoptimierung integriert.

Abbildung 29: Modellrahmen ENERTILE (Quelle: Fraunhofer ISI)



A.1.6 Modellbeschreibung REMOD

Untersuchungsschwerpunkte:

- Kostentoptimierte strukturelle Entwicklungen treibhausgasneutraler nationaler Energiesysteme
- Zukünftige jahresscharfe Ausbaupfade von Technologien sowie Marktanteil- und Technologietrends
- Technologiespezifische Betriebsführungsstrategien basierend auf der Interaktion sektor-kopplender Technologien
- Einfluss und Sinnhaftigkeit von Sektorkopplungstechnologien wie z.B. Elektrofahrzeuge, Elektrolyseuren oder elektrische Wärmepumpen im Gesamtsystemkontext

Hintergrund und Modellanwendung

Um die gesetzten Klimaschutzziele zu erreichen, hat die Bundesregierung die fundamentale Umgestaltung des Energiesystems beschlossen. Eine grundlegende Restrukturierung des heutigen Energiesystems ist somit unausweichlich. Wie und mit welchen Auswirkungen diese Umstrukturierung erfolgt, ist Gegenstand der Analysen mit dem Energiesystemmodell REMod:

Wie kann eine kostenoptimale Transformation eines nationalen Energiesystems - unter Berücksichtigung aller Energieträger und Verbrauchersektoren - im Einklang mit den erklärten Klimazielen und der Gewährleistung einer sicheren Energieversorgung erreicht werden? Aufgrund der individuell anpassbaren Durchführung von Szenario-basierten Simulationen, ist das Modell REMod

zur Beantwortung spezifischer Fragen zur Transformation nationaler Energiesysteme bestens geeignet. In wiederholter Zusammenarbeit mit Bundes- und Landesministerien, internationalen Forschungseinrichtungen und vor allem durch den engen Austausch mit Industriekunden wurde die Anwendbarkeit als strategisches Beratungs-Tool bewiesen und das Modell fortlaufend weiterentwickelt.

Modelleigenschaften:

Die Grundfunktionalität des Modells REMod beruht auf einer kostenbasierten (nicht-linearen) Optimierung nationaler Energieversorgungssysteme, deren energiebedingte CO₂-Emissionen einen vorgegebenen Zielwert und/oder Zielpfad nicht überschreiten. Das Optimierungsziel besteht darin, alle Generatoren, Speicher, Konverter und Verbraucher zu minimalen Kosten so zu dimensionieren, dass die Energiebilanz des Gesamtsystems zu jeder Stunde erfüllt wird. Jede Technologieeigenschaft kann hierbei in beliebiger Detailtiefe abgebildet werden. So können z.B. verschiedene Ladestrategien für batterie-elektrische Fahrzeuge oder die Interaktion von thermischen Speichern und unterschiedlichster Heizungssysteme realitätsnah abgebildet werden. Im Model wird somit neben der ökologischen Nachhaltigkeit und Wirtschaftlichkeit auch die Versorgungssicherheit durch eine hohe technische Detailtiefe sowie zeitliche Auflösung, die Energiebedarf und -nachfrage zu jeder Stunde über das gesamte Jahr hinweg in Einklang bringt, berücksichtigt. Ebenso können durch einen Mehr-Knoten-Ansatz unterschiedliche Regionen in dem Betrachtungsraum abgebildet und deren Interaktion untereinander untersucht werden, wodurch Rückschlüsse auf Infrastrukturmaßnahmen möglich sind.

Merkmale des Modells:

- Technischer Fokus: Beschreibung des Zusammenspiels der Energiesektoren Strom, Wärme, Mobilität und Industrie auf dem Transformationspfad bis 2045
- Ziel: Ermittlung der kostenoptimalen Umgestaltung des deutschen Energiesystems bis 2045 und Erreichung der festgelegten Reduktion von Treibhausgasemissionen.
- Typ des Energiesystemmodells: Technisches, Bottom-up Energiesystemmodell mit dynamischer, nicht-linearer Optimierung der Erweiterungsplanung
- Geographische Abdeckung: national (z.B. Deutschland) und regional möglich (z.B. Bundesländer)
- Zeitliche Auflösung: stündliche von 2020 (Kalibrierung) bis 2050
- Alle Sektoren: Nachfrage, Erzeugung, Speicherung, Energieumwandlung, Nachfragesteuerung sowie Infrastrukturen
- Rahmenbedingungen: Einhaltung einer festgelegten Reduktion von Treibhausgasemissionen (Budget und/oder jahresscharf)
- Umgang mit Unsicherheit: Sensitivitätsanalysen z.B. verschiedene Szenarioberechnungen
- Programmiersprache: julia / Python, Solver: Covariance Matrix Adaptation Evolution Strategy (CMA-ES)

Abbildung 30 zeigt den schematischen Aufbau des abgebildeten Energiesystems. Die Energienachfrageseite (rechts) wird dabei in vier Nutzungsbereiche unterteilt: Verkehr, Strom, Niedertemperatur- und Prozesswärme. In den Rechnungen wird das sogenannte „Ein-Knoten-Modell“ oder „Kupferplatten-Modell“ angenommen, in dem die Verteilung von Strom keinen Restriktionen unterliegt, das heißt, dass jede erzeugte und jede nachgefragte Einheit Strom im betrachteten Zeitschritt in ganz Deutschland verfügbar ist. Die notwendigen Kosten für Ausbau bzw. Betrieb des Stromnetzes sind in der Kostenrechnung enthalten.

Eine ausführliche Liste der Referenzen ist [hier](#) zu finden.

Abbildung 30: Schematische Darstellung des in REMod-D abgebildeten Energiesystems ohne die Darstellung der Subsysteme für Wärmeversorgung von Gebäuden und Verkehr (Quelle: Fraunhofer ISE)



A.1.7 Modellbeschreibung TIMES

Das Energiesystemmodell TIMES (The Integrated Market Eform System) ist eine in GAMS geschriebene Weiterentwicklung der beiden Modellgeneratoren MARKAL und EFOM-ENV. TIMES wurde in den letzten Jahren im Rahmen des „Energy Technology Systems Analysis Programme“ (ETSAP) der IEA unter Mitwirkung des IER entwickelt. Es ist somit in eine Klasse mit den Modellen MARKAL, EFOM oder MESSAGE einzuordnen. Der Modellgenerator TIMES wurde aus Gründen der Portierbarkeit in der allgemeinen Modellierungssprache GAMS entwickelt. TIMES ist ein mehrperiodisches,

lineares Optimierungsmodell, das auf einem prozesstechnischen Ansatz basiert, bei dem einzelne Anlagen im Energiesystem aggregiert abgebildet werden.

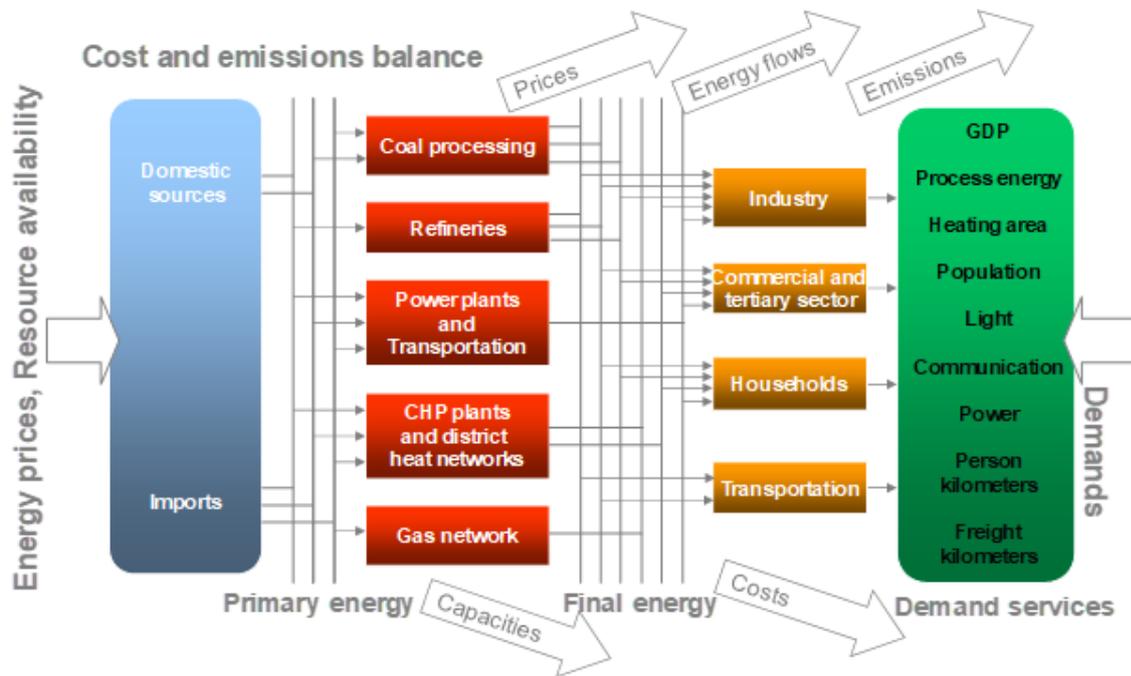
Ziel ist die Ermittlung der wirtschaftlich optimalen Struktur des Energiesystems bei einem vorzuziehenden Nutzenergie- bzw. Energiedienstleistungsbedarf und ggf. energie- und umweltpolitischen Vorgaben. Hierzu erfolgt eine Minimierung der diskontierten Aufwendungen des Energiesystems, wobei jedoch die einzelnen Akteure (Haushalte, Industrie, Energieversorgung) unterschiedliche wirtschaftliche Kalküle haben können. Vorrangige Zielsetzung der Modellentwicklung von TIMES ist die flexible Struktur, um eine einfache Anpassung der mathematischen Modellformulierung an die jeweilige Problemstellung zu gewährleisten.

TIMES-D ist ein Energiesystemmodell für Deutschland, in dem das deutsche Energiesystem mit seinen Strukturen und Wechselwirkungen detailliert abgebildet wird. Das Modell TIMES-D wurde ursprünglich im Rahmen der Dissertation von Remme 2006 entwickelt und wurde seitdem kontinuierlich am IER weiterentwickelt (zum Beispiel von Fais 2015, Haasz 2017) und für zahlreiche, vor allem nationale Projekte eingesetzt, unter anderem für die Energieprognose 2009 im Auftrag des BMWi. Modelliert sind die Energieflüsse von der Primärenergiebereitstellung bis zur Energiedienstleistung. Insgesamt sind knapp 2.700 Prozesstypen erfasst.

TIMES-D umfasst den Modellhorizont von 2015 bis 2050 und bildet sowohl Energieflüsse als auch (energie- und prozessbedingte) Treibhausgas- und Schadstoffemissionen ab. Zur Erfassung der zeitlichen Struktur der Energienachfrage und des Angebotes, insbesondere bei den erneuerbaren Energien, ist das Modell pro Meilensteinjahr in 672 Zeitsegmente untergliedert. Innerhalb des Modells sind alle Angebots- und Nachfragesektoren des Energiesystems erfasst. Dazu zählen die Ressourcenbereitstellung, die öffentliche Strom- und Wärmeversorgung sowie die Nachfragesektoren Industrie, Haushalte, Verkehr, Gewerbe, Handel, Dienstleistungen (GHD) und Landwirtschaft. Zwischen den einzelnen Sektoren bzw. zwischen den verschiedenen Technologien und Energieumwandlungspfaden ist ein vollständiger Wettbewerb unterstellt. Diese Sektoren sind detailliert und technologieorientiert mit den jeweiligen sektorspezifischen Besonderheiten abgebildet. Dazu zählen unter anderem Sterbekurven des Kraftwerksparks oder Potenziale für erneuerbare Energien sowie Einsparpotenziale im Gebäudebestand. Als nationales Modell für Deutschland wird TIMES-D bezüglich der Importe und Exporte von Energieträgern über Import- und Exportpreisannahmen geschlossen, die teilweise in Potenzialstufen weiter untergliedert sind.

Als optimierendes Energiesystemmodell können mit TIMES-D sehr einfach Szenarien mit Begrenzungen simuliert werden, seien es Obergrenzen für das Niveau des Primärenergieverbrauchs oder für die Treibhausgasemissionen oder Mindestanteile am Primär-, am Bruttoendenergie- oder am Endenergieverbrauch, zum Beispiel der erneuerbaren Energien. Somit kann mit einem Modelllauf analysiert werden, welche Strukturen sich im Energiesystem einstellen würden, um die Begrenzungen einhalten zu können, wobei die Wechselwirkungen im Energiesystem, zum Beispiel zwischen Stromnachfrage und -angebot, integriert berücksichtigt werden.

Abbildung 31: Optimierendes Energiesystemmodell TIMES-D



A.2 Annex

A.2.1 Interviewleitfaden der qualitativen Interviews potentieller Adopter*innen

Interviewleitfaden Manifold - Haushalte

Datum: _____ Interviewer(in): _____

Ort: _____ VP_Haushalt_Nummer: _____

Begrüßung und Vorstellung

Guten Tag Herr / Frau <Name>.

Ich bin <Name>

Ich arbeite in der Abteilung Methodenlehre und Biopsychologie des Instituts für Psychologie an der Technischen Universität Braunschweig und wir werden heute gemeinsam das Interview durchführen.

Die Dauer des Interviews beträgt etwa eine bis anderthalb Stunden.

Haben Sie sich so eingerichtet, dass Sie für diese Zeit ausreichend Ruhe haben, sich wohl fühlen und vielleicht einen Schluck Wasser parat haben?

Organisatorisches (Chat in Webex-Meeting Dokument nutzen)

Haben Sie die Allgemeinen Informationen für Teilnehmer und Teilnehmerinnen bekommen? Ja Nein
 In den Chat gestellt

Haben Sie noch Fragen zu den Allgemeinen Informationen für Teilnehmer und Teilnehmerinnen? Ja Nein
 Fragen beantwortet

Haben Sie die Einwilligungserklärung bekommen? Ja Nein
 In den Chat gestellt

Haben Sie noch Fragen zur Einwilligungserklärung? Ja Nein
 Fragen beantwortet

Dann würde ich Sie bitten, sich mit der Einwilligungserklärung einverstanden zu erklären. Einverständnis zur Einwilligungserklärung wurde gegeben

Erklären Sie sich mit einer künftigen Kontaktaufnahme einverstanden? Ja Nein

Sind Sie daran interessiert etwas über die Ergebnisse der Studie zu erfahren? Ja Nein

Erklären Sie sich bereit, dass eine Bild- oder Tonaufnahme gemacht wird? nur Ton Ton- und Bild

Haben Sie noch Fragen? Ja Nein
 Fragen beantwortet

Ok, dann schalte ich jetzt das Aufnahmegerät an.

Leitfaden-Interview

Das Thema mit dem wir uns beschäftigen ist, welche Erfahrungen Sie bei der Auswahl Ihres neuen Heizsystems gerade machen bzw. welche Erfahrungen Sie beim Kauf Ihres neuen Heizsystems kürzlich gemacht haben und welche Rolle dabei Ihr Heizungsinstallateur(in) bzw. Fachhandwerker(in) gespielt hat.

Technisches System

Was für ein Heizsystem haben Sie gekauft bzw. ausgewählt? Wie lange ist es schon installiert? Benutzen Sie es zusammen mit anderen Heizsystemen?

Haben Sie renoviert / saniert oder neu gebaut?

Leitfragen Kontextbeschränkungen

Wer hat alles Mitspracherecht dabei welche Heiztechnologie Sie kaufen? (sozial-Beziehungen: Nachbarn, Familienmitglieder, Freunde... und sozial-Institutionen: Regulierungen, Standardisierungen, Anreizprogramme, Fachhandwerker(innen), Energieberater(innen)...)

Wie haben Sie Ihre(n) Installateur(in) ausgewählt?

Wie viel Zeit (in Stunden) hatten / haben Sie für den Kauf des Heizsystems zur Verfügung? Wie viel für Wartungsaufgaben / Instandhaltung?

Wie viel Geld hatten / haben Sie für den Kauf des Heizsystems zur Verfügung? Wie viel für monatliche Heizkosten?

Leitfragen Antezedens

Kontingenzgeschichte Bevor Sie sich für Ihre neues Heizsystem entschieden haben, wie haben Sie bisher geheizt in Ihrem Wohnumfeld bzw. sich warmgehalten oder abgekühlt? (Alternative Wärmeregulationsverhaltensweisen; Aufwand und Dauer der Anwendung der bisherigen Heiztechnologie)

Verbalverhalten – andere Während der Auswahl des Heizsystems, was haben andere Personen darüber zu Ihnen gesagt? Und in welcher Form? Wie haben Sie darauf reagiert?

(Ratschläge, Regeln, Instruktionen...)

Verbalverhalten – selbst	Wem und was haben Sie anderen während des Auswahl Ihres Heizsystems darüber gesagt? Wie reagieren diese darauf?
Verbalverhalten – Installateur(in)	Was hat Ihr(e) Installateur(in) während des Auswahlprozesses und der Installation (Beratung) zu Ihnen gesagt? Was war Ihnen besonders wichtig in der Interaktion?
Beobachtetes Verhalten	Was haben Sie im Vorfeld der Entscheidung ein neues Heizsystem zu kaufen bei anderen (z.B. Familienmitglieder, Freunde, Nachbarn etc.) in Bezug auf ihr Heizverhalten beobachten können?
Diskriminative Hinweisreize	Was sind Änderungen, die Sie in ihrer Umgebung vor der Auswahl des neuen Heizsystems wahrgenommen haben? (z.B. Heizung kaputt gegangen, starker Anstieg der Heizkosten etc.)
Leitfragen Auswahl	
Operant – Auswahl	Wie sind Sie bei der Auswahl des Heizsystems vorgegangen? Was haben Sie gemacht?
Operant – Auswahl – Zeit	Wie lang (in Wochen / Monaten) war der Zeitraum, den der Auswahlprozess in Anspruch genommen haben? Wie viel Zeit (in Stunden) haben Sie im Schnitt in der Woche auf die Wahl des Heizsystems verwandt?
Operant – Interaktion – Installateur(in)	Wie viel Zeit (in Stunden) haben Sie insgesamt während des Auswahlprozesses und auf die Interaktion mit dem (der) Installateur(in) verwandt?

Kontingenzen – Auswahl Was sind Änderungen, die Sie in ihrer Umgebung während der Auswahl des neuen Heizsystems wahrgenommen haben?

Wie haben sich diese Konsequenzen in Ihren Regelmäßigkeiten / Abläufen geändert?

Wie wichtig sind Ihnen die verschiedenen Konsequenzen?

- Interaktion Installateur(in) Wie hängen diese Konsequenzen mit dem Verhalten des (der) Installateurs(in) zusammen? (kooperativ oder kompetitiv?)

- Interaktion – andere Wie hängen diese Konsequenzen mit dem Verhalten anderer Personen zusammen? (kooperativ oder kompetitiv?)

Leitfragen Kauf (optional)

Operant – Kauf Wie sind Sie beim Kauf des Heizsystems vorgegangen? Was haben Sie gemacht?

Operant – Kauf – Zeit Wie lang (in Wochen / Monaten) war der Zeitraum, den der Kauf in Anspruch genommen haben?

Wie viel Zeit (in Stunden) haben Sie im Schnitt in der Woche auf den Kauf des Heizsystems verwandt?

Operant – Interaktion – Installateur(in) Wie viel Zeit (in Stunden) haben Sie insgesamt während des Kaufes auf die Interaktion mit dem (der) Installateur(in) verwandt?

Kontingenzen – Kauf Was sind Änderungen, die Sie in ihrer Umgebung nach dem Kauf des neuen Heizsystems wahrgenommen haben? (z.B. weniger Geld für andere Aktivitäten)

Was waren andere Konsequenzen, die neu hinzugekommen sind oder sich geändert haben durch den Kauf /die Wahl des neuen Heizsystems?

Wie haben sich diese Konsequenzen in Ihren Regelmäßigkeiten / Abläufen geändert?

Wie wichtig sind Ihnen die verschiedenen Konsequenzen?

- Interaktion – Installateur(in) Wie hängen diese Konsequenzen mit dem Verhalten des (der) Installateurs(in) zusammen? (kooperativ oder kompetitiv?)

- Interaktion – andere Wie hängen diese Konsequenzen mit dem Verhalten anderer Personen zusammen? (kooperativ oder kompetitiv?)

Leitfragen Nutzung (optional)

Operant – Nutzung Wie nutzen Sie Ihr neues Heizsystem zur Wärmeregulation? Gibt es neue Verhaltensweisen bzw. Dinge, die Sie vorher nicht gemacht haben? (z.B. in Bezug auf die Art wie Sie die Wärme regulieren - mehr Räume heizen, höhere Thermostateinstellung, längere Heizperiode, dauerheizen, überwachen von Smart-meter Anzeige etc.)

Kontingenzen – Nutzung Was sind Änderungen, die Sie in Ihrer Umgebung jetzt während der Nutzungsphase des neuen Heizsystems wahrnehmen?

Wie haben sich diese in Ihren Regelmäßigkeiten verändert (z.B. Änderungen alternativer Wärmeregulationsverhaltensweisen)

Wie wichtig sind Ihnen die verschiedenen Konsequenzen?

- Interaktion – Installateur(in) Wie hängen diese Konsequenzen mit dem Verhalten des (der) Installateurs(in) zusammen? (kooperativ oder kompetitiv?)

- Interaktion – andere Wie hängen diese Konsequenzen mit dem Verhalten anderer Personen zusammen? (kooperativ oder kompetitiv?)

Leitfragen verbale Kontingenzen Auswahl, Kauf, Nutzung

Kontingenzen – verbal Was haben Sie an Änderungen nach dem Treffen der Auswahlentscheidung / nach dem Kauf wahrgenommen in Gesprächen mit anderen über Heizsysteme? (Nachbarn, Familie, Partner, Freunde, Bekannte, Internetforen). Wie haben Sie Ratschläge, Hinweise oder Anweisungen bekommen? Oder selber gegeben?

Kontingenzen – verbal Wie haben sich die Themen und deren Häufigkeit oder Regelmäßigkeit geändert?

Leitfragen Bewertung

Bewertung Welche Konsequenzen oder Aspekte bei der Auswahl und / oder dem Kauf eines Heizsystems müssten sich ändern, um eine hoch innovative, kaum erprobte umweltfreundliche bzw. CO2- emissionsarme Technologie zu kaufen?

Pile-sort Task

Aufbau

Der/ die Versuchsleiter/-in teilt den Bildschirm im Videokonferenztool mit Blick auf ein online Whiteboard. Der Teilnehmer oder die Teilnehmerin wird gebeten, einem Link zu diesem Browser basierten Whiteboard (miro¹) zu folgen. Dort kann anonymisiert die Pile-sort Aufgabe erledigt werden.

Instruktion Sortieren

Im oberen, grünen Bereich sehen Sie verschiedene Aspekte, die beim Kauf von innovativen Heiztechnologien eine Rolle spielen können.

Bitte sortieren Sie diese Aspekte hinsichtlich ihrer Ähnlichkeit in Stapel, die für Sie zusammengehören. Wenn Sie einen Notizzettel in mehrere Stapel sortieren möchten, dann können Sie das. Ich kopiere dann den Notizzettel und Sie können ihn einsortieren.

Mögliche Nachfrage: „Was heißt zusammengehören?“

Antwort: „Mich interessiert hier wirklich sehr, was Sie denken, welche Aspekte zusammengehören und es gibt keine richtigen oder falschen Antworten“.

Mögliche Nachfrage: „Wie viele Stapel soll ich machen?“

Antwort: „Sie können so viele Stapel machen, wie Sie möchten, aber Sie dürfen nicht alles in einen Stapel sortieren und nicht jeden Notizzettel als eigenen Stapel machen.“

Beispiel Materialanordnung in miro

(Notizzettel können per drag-and-drop bewegt werden)

Im oberen, grünen Bereich sehen Sie verschiedene Aspekte, die beim Kauf von Heiztechnologien eine Rolle spielen können.
Bitte sortieren Sie diese Aspekte hinsichtlich ihrer Ähnlichkeit in Stapel, die für Sie zusammengehören.
Wenn Sie einen Notizzettel in mehrere Stapel sortieren möchten, dann können Sie das, ich kopiere dann den Notizzettel und Sie können ihn einsortieren.

The screenshot shows a Miro whiteboard interface. At the top, there is a green header bar with a grid of sticky notes containing various aspects related to heating technologies. Below the grid, there are seven vertical columns labeled 'Stapel 1' through 'Stapel 7', intended for sorting the sticky notes based on similarity.

¹ Information der Technischen Universität Braunschweig zu miro (abgerufen von <https://www.tu-braunschweig.de/lehreundmedienbildung/unser-angebot/medien-und-infrastruktur/tools-fuer-die-lehrgestaltung/kommunikation-und-kollaboration#c289514> am 02.02.2021): „Alle User-Informationen, die im Rahmen der Nutzung erhoben werden, sind über das EU-U.S. and Swiss-U.S. Privacy Shield Framework geschützt. Die Rechte erstellter Inhalte liegen laut RT bei den Nutzern und Nutzerinnen – die Betreiber und Betreiberinnen behalten sich jedoch vor, die Daten für interne Optimierungsprozesse zu verwenden. Weitere Informationen finden Sie unter: <https://realtimeboard.com/legal/terms-of-service/> und <https://realtimeboard.com/security/>.“

Instruktionen Labeln

Bitte benennen Sie jeden Stapel, den Sie machen und beschreiben Sie ihn.

Ergebnis notieren: Name für jeden Stapel notieren und die Kriterien für die Sortierung.

Stapel # 1: _____

Stapel # 2: _____

Stapel # 3: _____

Stapel # 4: _____

Stapel # 5: _____

Stapel # 6: _____

Stapel # 7: _____

Stapel # 8: _____

Stapel # 9: _____

Ergebnis notieren: Jeder Notizzettel hat ein Zahlen Code. Diese werden für die jeweiligen Stapel festgehalten.

Stapel # 1: _____
Stapel # 2: _____
Stapel # 3: _____
Stapel # 4: _____
Stapel # 5: _____
Stapel # 6: _____
Stapel # 7: _____
Stapel # 8: _____
Stapel # 9: _____

Daten speichern: Den Arbeitsbereich bzw. „frame“ in miro als PDF-Datei speichern.
Dateiname: VP_nummer_pile.pdf

Free List Aufgaben

Instruktion:

Listen Sie alle Heizungstechnologien, die Ihnen einfallen (und schreiben Sie diese ins Chat-Protokoll).

Unspezifischer Prompt (Brewer et al., 2002, S.347): Was für andere Heizungstechnologien fallen Ihnen noch ein?

Antworten wörtlich in der benannten Reihenfolge notieren

1	_____
2	_____
3	_____
4	_____
5	_____
6	_____
7	_____
8	_____
9	_____
10	_____
11	_____
12	_____
13	_____
14	_____
15	_____

Soziodemographische Fragen

Dann würde ich Ihnen abschließend gerne noch ein paar Fragen zu Ihrer Person stellen.

Wie alt sind Sie?	_____Jahre
Welchem Geschlecht fühlen Sie sich zugehörig?	<input type="checkbox"/> männlich <input type="checkbox"/> weiblich <input type="checkbox"/> divers
Was ist Ihr höchster Bildungsabschluss?	<input type="checkbox"/> Kein Schulabschluss <input type="checkbox"/> Hauptschulabschluss <input type="checkbox"/> Realschulabschluss <input type="checkbox"/> Fachhochschulreife <input type="checkbox"/> Allgemeine Hochschulreife (Abitur) <input type="checkbox"/> Abschluss an einer Fach-, Meister-, Technikerschule, Berufs- oder Fachakademie <input type="checkbox"/> Fachhochschulabschluss (z.B. Bachelor, Master, Diplom) <input type="checkbox"/> Universitätsabschluss (z.B. Bachelor, Master, Diplom, Magister, Staatsexamen) <input type="checkbox"/> Promotion <input type="checkbox"/> Ein anderer Bildungsabschluss, und zwar _____
Wie hoch ist das ungefähre monatliche Nettoeinkommen Ihres gesamten Haushaltes?	<input type="checkbox"/> Weniger als 900 €/Monat <input type="checkbox"/> 900 €/Monat – 1.500 €/Monat <input type="checkbox"/> 1.500 €/Monat – 2.000 €/Monat <input type="checkbox"/> 2.000 €/Monat – 2.600 €/Monat <input type="checkbox"/> 2.600 €/Monat – 3.600 €/Monat <input type="checkbox"/> 3.600 €/Monat – 5.000 €/Monat <input type="checkbox"/> Mehr als 5.000 €/Monat <input type="checkbox"/> Keine Angabe
In welcher Erwerbssituation befinden Sie sich?	<input type="checkbox"/> Vollzeitbeschäftigt (mehr als 30 Std./Woche) <input type="checkbox"/> Teilzeitarbeit (bis max. 30 Std./Woche) <input type="checkbox"/> Geringfügig bzw. unregelmäßig erwerbstätig, 450-Euro-Job, Minijob <input type="checkbox"/> In einer beruflichen Ausbildung/Lehre oder betrieblichen Umschulung <input type="checkbox"/> Freiwilliger Wehrdienst/Freiwilliges Soziales oder Ökologisches Jahr <input type="checkbox"/> Nicht erwerbstätig, und zwar _____
Wie viel Stunden Freizeit haben Sie durchschnittlich pro Woche?	

<p>Wie sieht Ihre aktuelle Wohnsituation aus?</p>	<p><input type="checkbox"/> Eigentümer eines Hauses</p> <p>Ergänzung weitere Studien</p> <p><input type="checkbox"/> Eigentümer einer Wohnung</p> <p><input type="checkbox"/> Mietverhältnis in einem Haus</p> <p><input type="checkbox"/> Mietverhältnis in einer Wohnung</p>	
<p>Wie lautet Ihre Postleitzahl?</p>		
<p>Wie viele Personen (mit Ihnen) leben in Ihrem Haushalt?</p>	<p>unter 18</p>	<p>18 oder älter</p>
<p>Wie viele Quadratmeter (Wohnfläche) hat Ihr Haus?</p>		
<p>Wie hoch sind die jährlichen Heizkosten Ihres Haushaltes im Durchschnitt? (Falls Sie die Heizkosten Ihres Haushaltes nicht kennen und auch nicht einschätzen können, können Sie dieses Feld freilassen)</p>		

Ausklang

Bedanken, offene Fragen, Kontaktmöglichkeit, Information Aufwandsentschädigung,
Information Zeitpunkt Ergebnismeldung, Verabschieden

A.2.2 Transkriptionsleitfaden

Transkriptionsregeln (angepasst nach Rädiker & Kuckartz, 2019, pp. 44–45)

1. Es wird wörtlich transkribiert, also nicht lautsprachlich oder zusammenfassend. Vorhandene Dialekte werden nicht mit transkribiert, sondern möglichst genau in Hochdeutsch übersetzt. Ausnahme: der Dialekt ist nicht eindeutig übersetzbar.
2. Sprache und Interpunktion werden leicht geglättet, d.h. an das Schriftdeutsch angenähert. Zum Beispiel wird aus „Sie saß auf so´m Stuhl“ → „Sie saß auf so einem Stuhl“.
3. Bei Satzzeichen auf Lesbarkeit und Bedeutungszusammenhänge achten. Im Zweifelsfall einen Punkt dem Komma vorziehen.
4. Satzabbrüche werden durch einen Gedankenstrich „-“ gekennzeichnet. Wortabbrüche werden ausgelassen. Teilsatzabbrüche werden durch Gedankenstrich und Komma „-,“ gekennzeichnet.
5. Doppelte Wörter werden entfernt, außer der Sprecher bzw. die Sprecherin nutzt sie zur Betonung oder Verstärkung.
6. Die Satzform und Artikel (bestimmt und unbestimmt) etc. werden auch dann beibehalten, wenn sie Fehler enthalten.
7. Pausen werden durch drei Auslassungspunkte in Klammern (...) markiert.
8. Absätze der interviewenden Person werden durch ein „I:“, die der befragten Person durch ein „B:“ gekennzeichnet.
9. Jeder Beitrag eines Sprechers bzw. einer Sprecherin wird als eigener Absatz transkribiert. Zwischen den Beiträgen gibt es eine Leerzeile. Jeder Absatzanfang ist mit einer Zeitmarke versehen. Beispiel: [00:01:26]
10. Zustimmungde bzw. bestätigende Lautäußerungen (mhh, ahn etc.) der interviewenden Person und der befragten Person werden nicht transkribiert, sofern sie den Redefluss der anderen Person nicht unterbrechen. Ausnahme: Eine Antwort besteht nur aus „mhm“ ohne jegliche weitere Ausführung. Dies wird als „mhm (bejahend)“, oder „mhm (verneinend)“ erfasst, je nach Interpretation.
11. Lautäußerungen der Befragten wie auch der interviewenden Person werden in Doppelklammern notiert, z.B. ((lacht)) und Ähnliches. Nonverbale Aktivitäten werden nicht kodiert.
12. Unterbrechungen, die nicht als Sprach- oder Lautäußerung von InterviewerIn und Befragte transkribiert werden, werden als Satzabbruch mit Grund in Klammern „Für mich ist ein schöner Tag“- (Ausfall der Technik) gekennzeichnet.
13. Unverständliche Wörter werden mit (unv.) gekennzeichnet. In der Klammer können auch Vermutungen zum Wort mit „?“ angestellt werden, z.B.: „Methylphenylinat (unv., Methylphenidat?)“
14. Alle Angaben, die einen Rückschluss auf eine befragte Person erlauben, werden in Großbuchstaben anonymisiert. Zum Beispiel: „Ich wohne derzeit im Neubaugebiet von Wolfsburg“ wird anonymisiert als „Ich wohne derzeit im Neubaugebiet von STADT“.
15. Das Transkript wird als .docx-Datei gespeichert. Dateiname ist „Transkript_Haushalt_VP_Angabe der Interviewnummer“ oder „Transkript_Installateur_VP_Angabe der Interviewnummer“, also z.B. Transkript_Haushalt_VP_2

Quelle: Rädiker, S., & Kuckartz, U. (2019). Analyse qualitativer Daten mit MAXQDA. Springer Fachmedien Wiesbaden. <https://doi.org/10.1007/978-3-658-22095-2>

A.2.3 Überarbeitetes Kodiersystem nach zehn Prozent Materialdurchgang

Contingencies heating systems.mx20
08.07.21

The following changes were made compared to version 1:

Checking the intercoder agreement between coder 1 and coder 2 showed following problems:

- *segmentation mistakes*: coding of larger paragraphs with multiple relevant aspects instead of coding each relevant aspect separately
- *segmentation mistakes*: in tendency, one coder coded complete sentences instead of meaningful phrases
- *category mistake*: some relevant text passages were overlooked by one or the other coder, but were consensually viewed as relevant
- *category mistake*: the category "interlocking contingencies" (# 14.4, 14.5, 15.4, 15.5, 16.4, 16.5, 17.4, 17.5, 18.4, 18.5) had most difficulties. The coding scheme is altered to include in the description, that "Interactions are also coded if a contingency is not explicitly stated in the text".
- *category mistake*: the category "context constraint..." (# 4, 5) versus "changes for..." (# 21, 22) is difficult to differentiate because often stating what needs change includes statements about constraints that are currently in place. The coding scheme is altered to include in the description of the category "changes for...", that "This category is coded if the context is about what has to be changed and can include reference to context constraints. In this case context constraints are not coded separately."

Spelling mistakes in the coding scheme are corrected.

Codesystem

1 verbalizations during pile-sort task
2 technical system potential adopter
2.1 renovating home
2.2 new built home
2.3 type of heating system chosen or bought
3 technical system technicians
3.1 types of technologies
3.2 specializations
3.3 types of services
3.4 differences between newly built and renovation
4 context constraint buying heating system
5 context constraint recommending
6 history contingencies heating
7 history contingencies recommending

8 discriminative stimuli choosing and buying heating system
9 discriminative stimuli recommending
10 observed behavior others heating
11 observed behavior others recommending
12 verbal behavior about choosing and buying
12.1 verbal oneself
12.2 verbal others
12.3 verbal technician
13 verbal behavior about recommending
13.1 verbal oneself
13.2 verbal other
13.3 verbal potential adopters
14 operant contingencies choosing heating system
14.1 description operant
14.2 time of operant
14.3 contingencies
14.4 interlocking contingencies technicians
14.5 interlocking contingencies others
15 operant contingencies buying heating system
15.1 description operant
15.2 time of operant
15.3 contingencies
15.4 interlocking contingencies technicians
15.5 interlocking contingencies others
16 operant contingencies using heating system
16.1 description operant
16.2 time of operant
16.3 contingencies
16.4 interlocking contingencies technicians
16.5 interlocking contingencies others
17 operant contingencies recommending during choosing
17.1 description operant
17.2 time of operant
17.3 contingencies
17.4 interlocking contingencies adopters

17.5 interlocking contingencies others
18 operant contingencies recommending during installation
18.1 description operant
18.2 time of operant
18.3 contingencies
18.4 interlocking contingencies adopters
18.5 interlocking contingencies others
19 evaluative category contingencies adopters
20 evaluative category contingencies technicians
21 changes for buying innovative, renewable technologies
22 changes for recommending innovative, renewable technologies

1 verbalizations during pile-sort task

During the online interview participants did a pile-sort task on an online whiteboard. This code marks all the verbalizations during the pile-sort task from participant as well as interviewer as one chunk of code.

2 technical system potential adopter

What kind of technology did the potential adopters choose or adopters buy and install in their new home or as part of a renovation.

2.1 renovating home

heating system was chosen or bought as renovation measure

2.2 new built home

heating system installed in a newly built house

2.3 type of heating system chosen or bought

type of heating technology that was chosen or bought

3 technical system technicians

e.g., types of technologies, specializations, types of services, differences newly built homes versus renovations

3.1 types of technologies

portfolio of technologies

3.2 specializations

technology specializations

3.3 types of services

services offered as part of installing heating systems

3.4 differences between newly built and renovation

do the technicians have different offers for newly built homes versus when a renovation is asked for. What are the main differences?

4 context constraint buying heating system

Constraints for buying or choosing a heating system. They can be for example organismic or resource constraints, due to social-relationships or social-institutions.

5 context constraint recommending

Constraints for recommending a heating system. They can be for example organismic or resource constraints, due to social-relationships or social-institutions.

6 history contingencies heating

previous contingencies relative to operant heating

7 history contingencies recommending

previous contingencies relative to operant recommending a heating system

8 discriminative stimuli choosing and buying heating system

changes that coincide with changes in operant choosing and buying a heating system

9 discriminative stimuli recommending

changes that coincide with changes in operant recommending

10 observed behavior others heating

observed behaviors in others on their heating behavior and choice of heating system

11 observed behavior others recommending

observed recommending behavior in others

12 verbal behavior about choosing and buying

verbal behavior from others, from oneself and especially from the technician, during choosing and buying a heating system

12.1 verbal oneself

verbal behavior from oneself

12.2 verbal others

all others except technicians

12.3 verbal technician

verbal behavior from technicians

13 verbal behavior about recommending

verbal behavior about recommending from others, from oneself and from potential adopters (customers)

13.1 verbal oneself

verbal behavior from oneself

13.2 verbal other

all others except potential adopters

13.3 verbal potential adopters

verbal behavior from technicians

14 operant contingencies choosing heating system

contingencies for the operant choosing a heating system

14.1 description operant

description of for example topography, sequences, smaller behavioral units as part of operant.

14.2 time of operant

the amount of time the operant behavior usually takes up

14.3 contingencies

consequences which are produced by the interaction of the individual with physical context

14.4 interlocking contingencies technicians

consequences which are produced by the interaction with technicians

14.5 interlocking contingencies others

consequences which are produced by the interaction of the individual with others

15 operant contingencies buying heating system

contingencies for the operant buying a heating system

15.1 description operant

description of for example topography, sequences, smaller behavioral units as part of operant.

15.2 time of operant

the amount of time the operant behavior usually takes up

15.3 contingencies

consequences which are produced by the interaction of the individual with physical context

15.4 interlocking contingencies technicians

Consequences which are produced by the interaction with technicians. Interactions are also coded if a contingency is not explicitly stated in the text.

15.5 interlocking contingencies others

Consequences which are produced by the interaction of the individual with others. Interactions are also coded if a contingency is not explicitly stated in the text.

16 operant contingencies using heating system

contingencies for the operant using a heating system

16.1 description operant

description of for example topography, sequences, smaller behavioral units as part of operant.

16.2 time of operant

the amount of time the operant behavior usually takes up

16.3 contingencies

consequences which are produced by the interaction of the individual with physical context

16.4 interlocking contingencies technicians

Consequences which are produced by the interaction with technicians. Interactions are also coded if a contingency is not explicitly stated in the text.

16.5 interlocking contingencies others

Consequences which are produced by the interaction of the individual with others. Interactions are also coded if a contingency is not explicitly stated in the text.

17 operant contingencies recommending during choosing

contingencies for the operant recommending a heating system during the potential adopters' choosing behavior

17.1 description operant

description of for example topography, sequences, smaller behavioral units as part of operant.

17.2 time of operant

the amount of time the operant behavior usually takes up

17.3 contingencies

consequences which are produced by the interaction of the individual with physical context

17.4 interlocking contingencies adopters

Consequences which are produced by the interaction with potential adopters or customers. Interactions are also coded if a contingency is not explicitly stated in the text.

17.5 interlocking contingencies others

Consequences which are produced by the interaction of the individual with others (e.g., craft associations). Interactions are also coded if a contingency is not explicitly stated in the text.

18 operant contingencies recommending during installation

contingencies for the operant recommending on how to use a heating system during the installation of a heating system

18.1 description operant

description of for example topography, sequences, smaller behavioral units as part of operant.

18.2 time of operant

the amount of time the operant behavior usually takes up

18.3 contingencies

consequences which are produced by the interaction of the individual with physical context

18.4 interlocking contingencies adopters

Consequences which are produced by the interaction with potential adopters or customers. Interactions are also coded if a contingency is not explicitly stated in the text.

18.5 interlocking contingencies others

Consequences which are produced by the interaction of the individual with others (e.g., craft associations). Interactions are also coded if a contingency is not explicitly stated in the text.

19 evaluative category contingencies adopters

Importance of a contingency dimension

Categories: low, medium, high, (not applicable)

In the text material contingencies of operants are coded. Those can be abstracted and maybe explicated to relate to underlying dimensions of contingencies. If explication is possible, those dimensions will be evaluated. If not, the summarized contingencies will be evaluated.

20 evaluative category contingencies technicians

Importance of a contingency dimension

Categories: low, medium, high, (not applicable)

In the text material contingencies of operants are coded. Those can be abstracted and maybe explicated to relate to underlying dimensions of contingencies. If explication is possible, those dimensions will be evaluated. If not, the summarized contingencies will be evaluated.

21 changes for buying innovative, renewable technologies

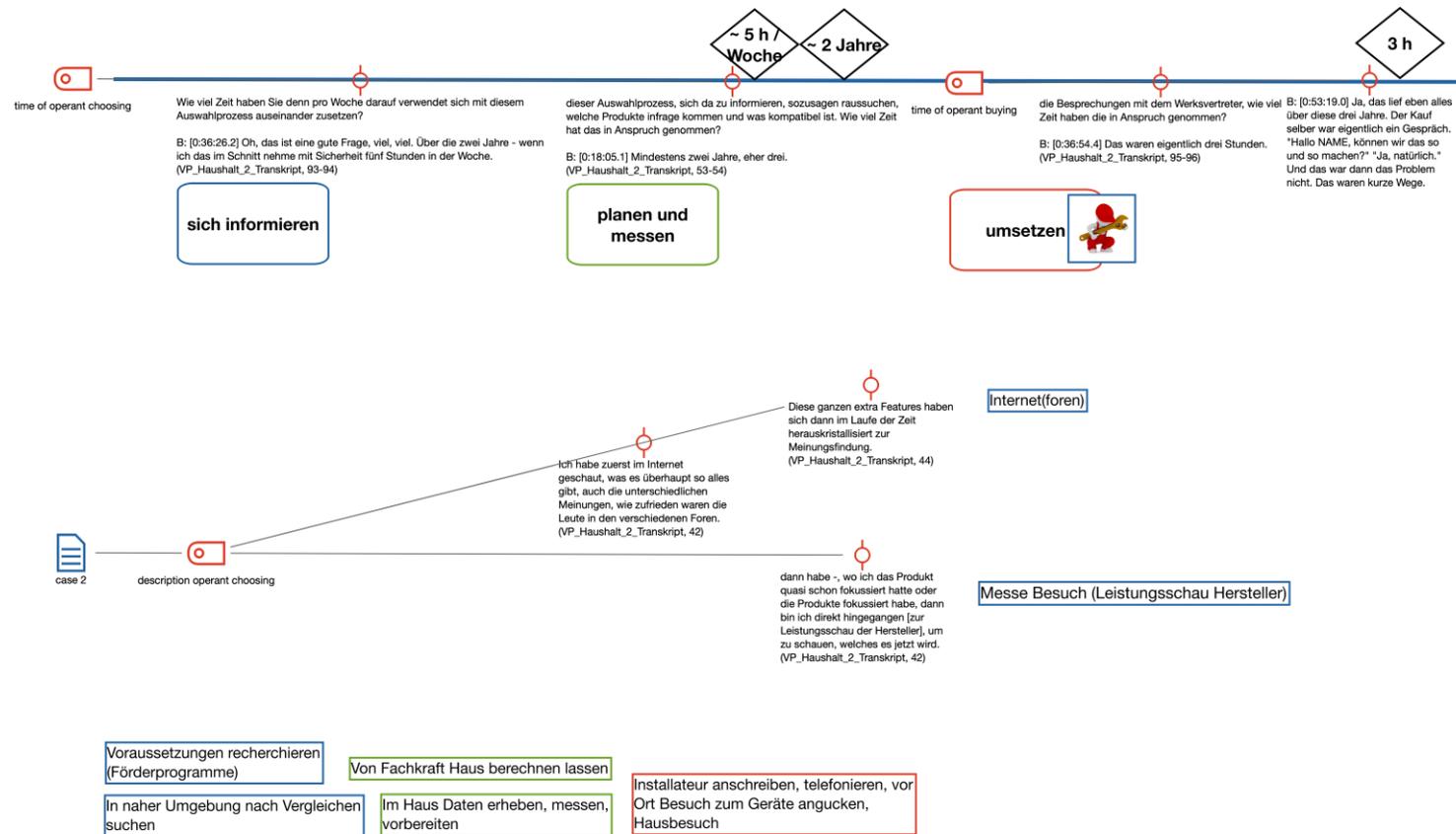
Context changes that could help change buying behavior towards more innovative, environmentally friendly and sustainable heating systems. This category is coded if the context is about what has to be changed and can include reference to context constraints. In this case context constraints are not coded separately.

22 changes for recommending innovative, renewable technologies

Context changes that could help change recommending behavior towards recommending more innovative, environmentally friendly and sustainable heating systems. This category is coded if the context is about what has to be changed and can include reference to context constraints. In this case context constraints are not coded separately.

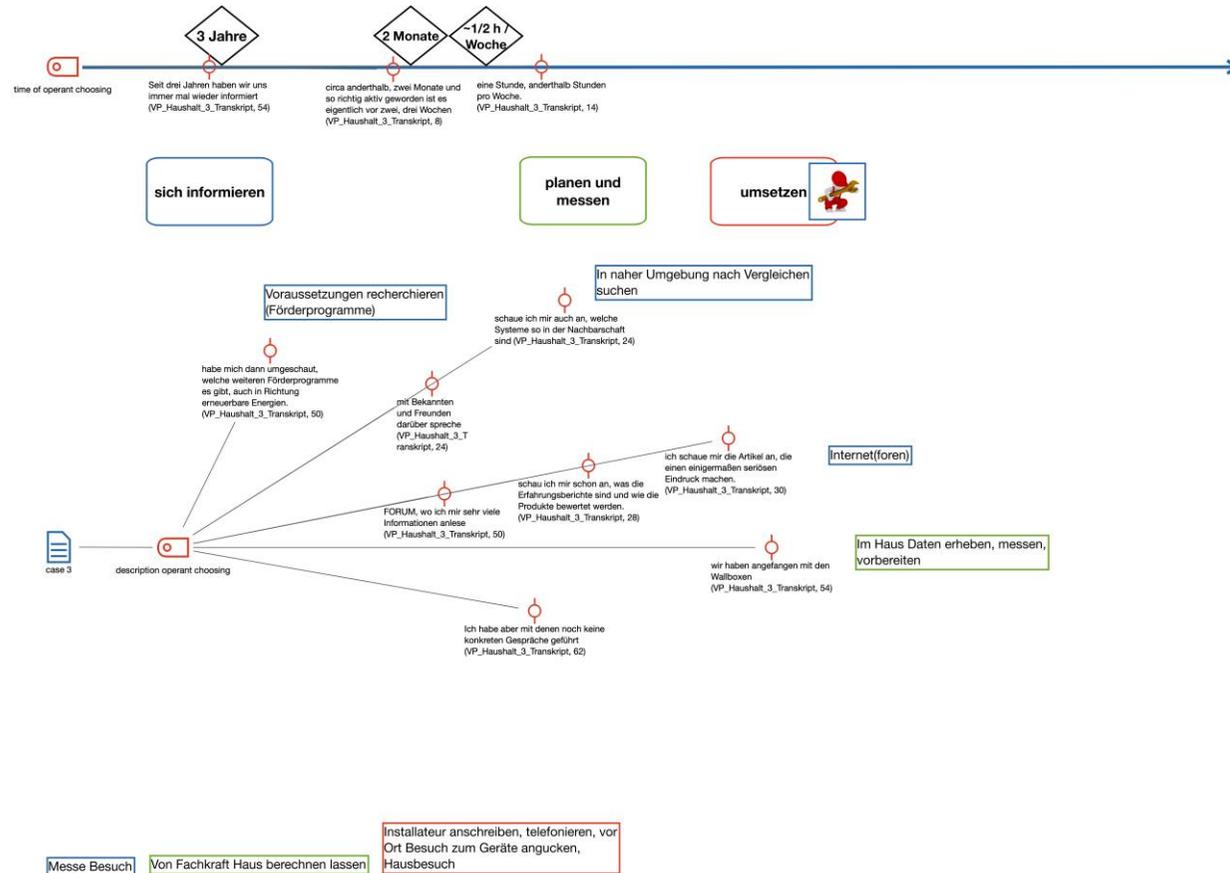
A.2.4 Konzeptkarten der Prozessschritte, Verhaltenssequenzen und deren zeitlicher Dauer

A.2.4.1 Fall 2



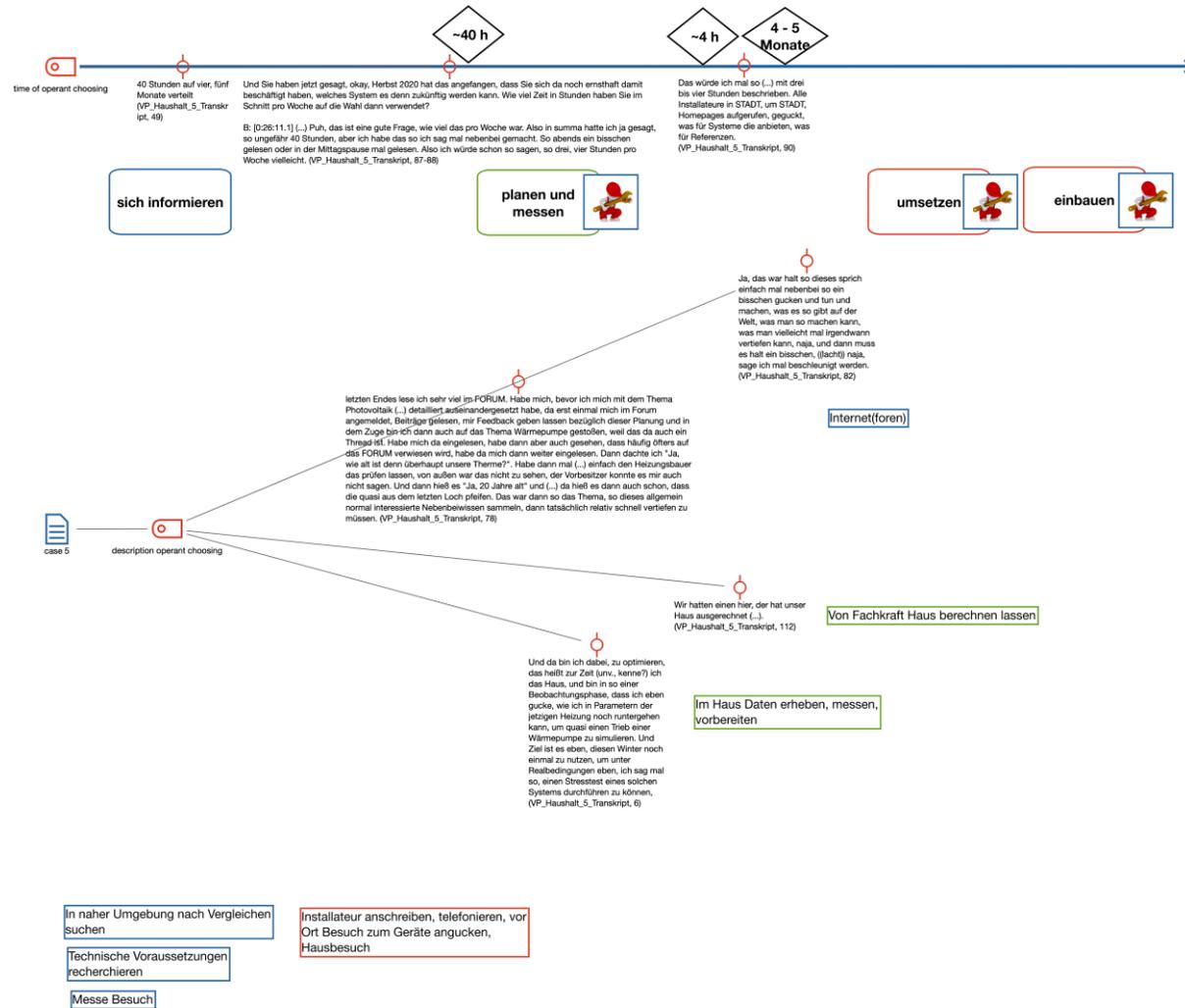
Bildquelle: Bild von Peggy und Marco Lachmann-Anke auf Pixabay

A.2.4.2 Fall 3



Bildquellen: Bild von Peggy und Marco Lachmann-Anke auf Pixabay

A.2.4.3 Fall 5



In naher Umgebung nach Vergleichen suchen

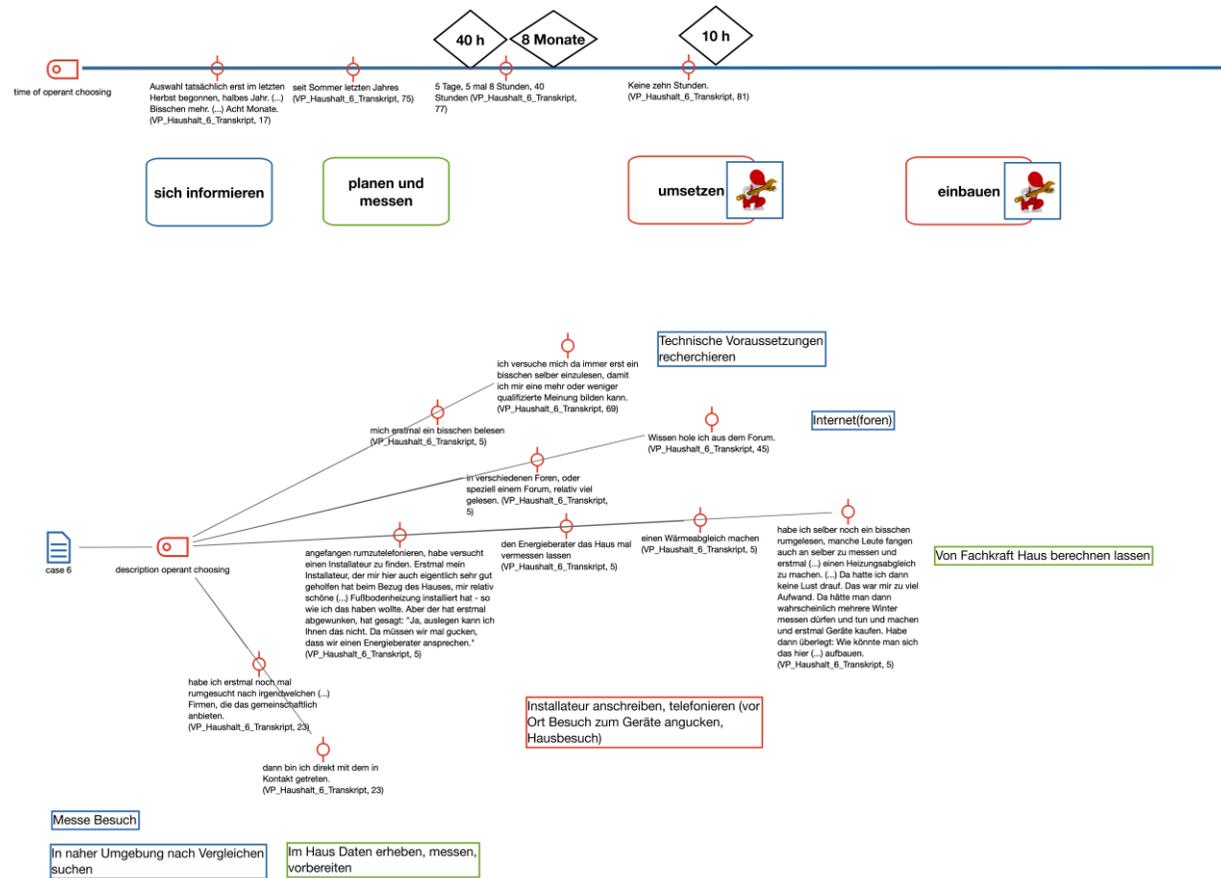
Technische Voraussetzungen recherchieren

Messe Besuch

Installateur anschreiben, telefonieren, vor Ort Besuch zum Geräte angucken, Hausbesuch

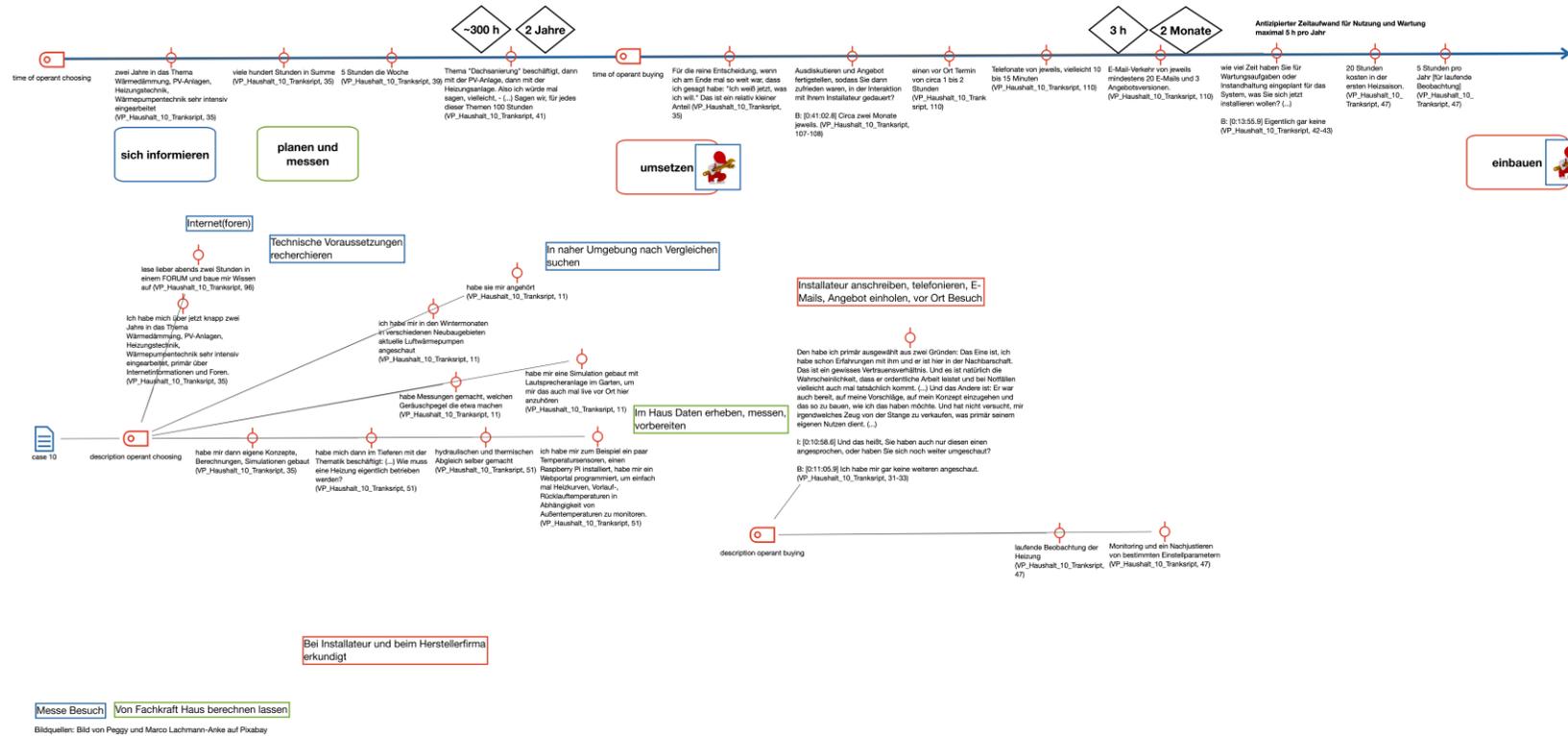
Bildquellen: Bild von Peggy und Marco Lachmann-Anke auf Pixabay

A.2.4.4 Fall 6

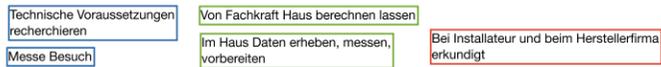
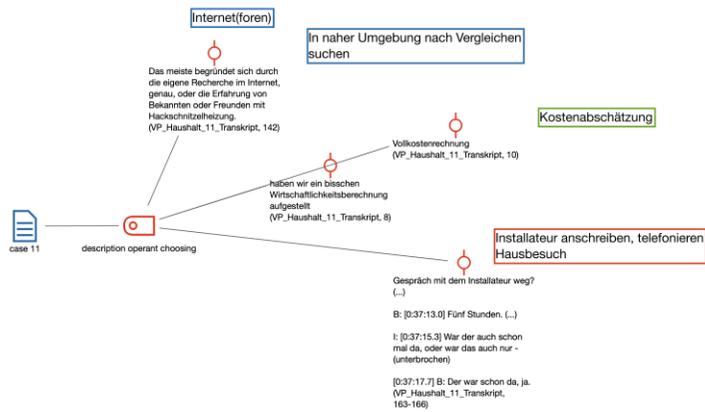
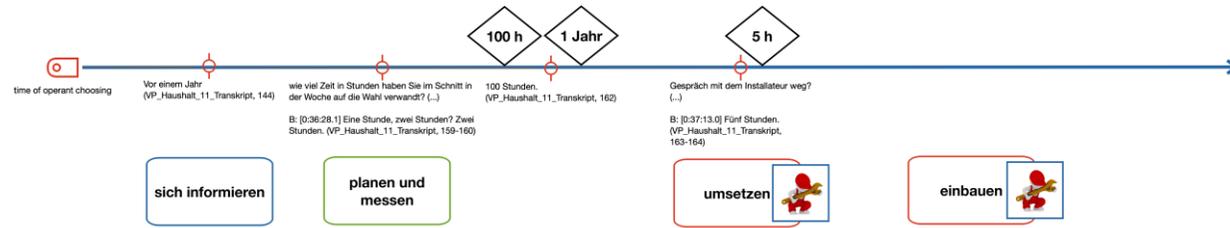


Bildquellen: Bild von Peggy und Marco Lachmann-Anke auf Pixabay

A.2.4.5 Fall 10

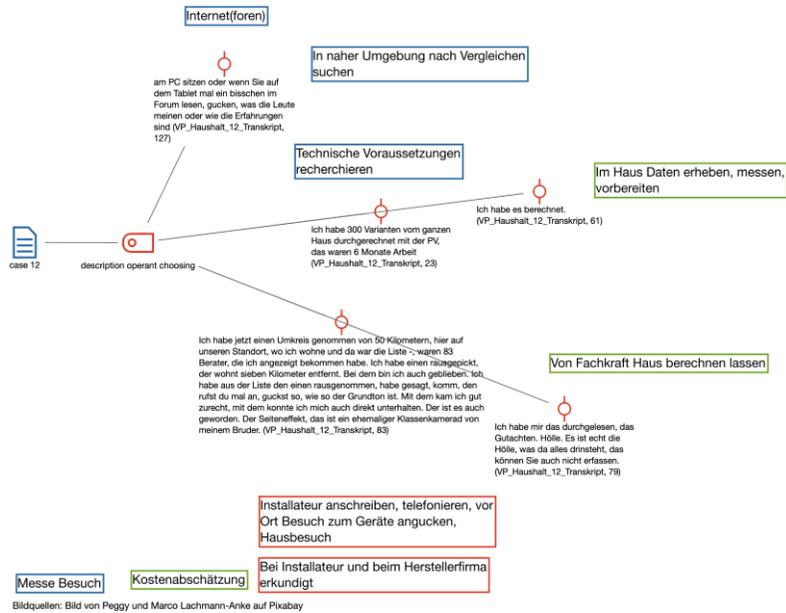
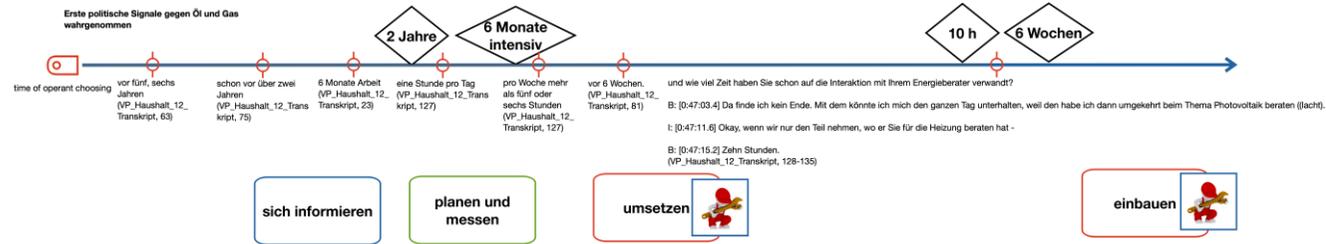


A.2.4.6 Fall 11

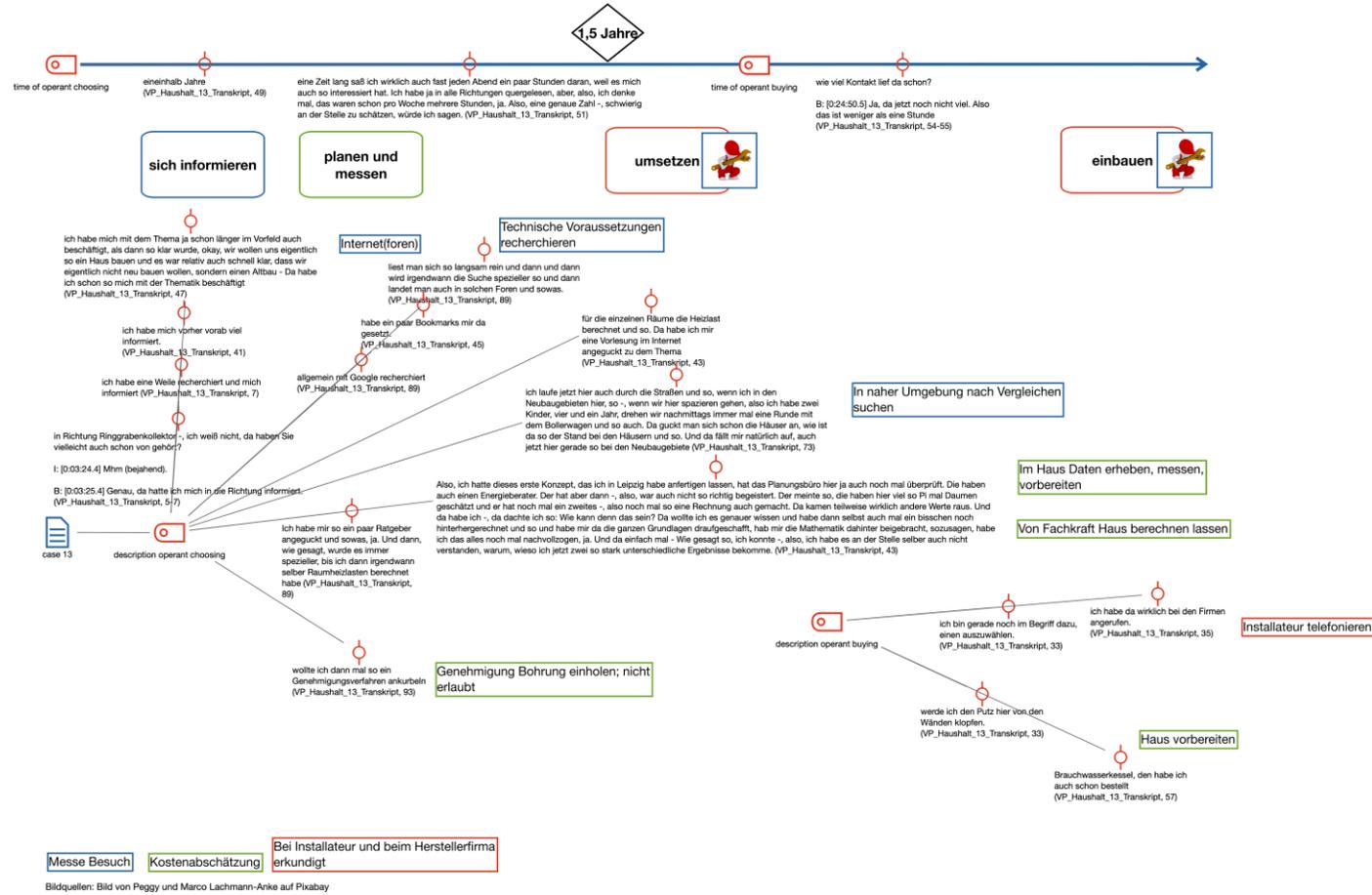


Bildquellen: Bild von Peggy und Marco Lachmann-Anke auf Pixabay

A.2.4.7 Fall 12



A.2.4.8 Fall 13



A.1.5 Meilenstein-Dokument 6: Dokument zu Vor- und Nachteilen unterschiedlicher Arten der Einbindung von empirischem Input in techno-ökonomische Modelle

Manifold

Einbindung von empirischem Input in techno-ökonomische Modelle

Vor- und Nachteile unterschiedlicher Arten der Einbindung von empirischem Input in techno-ökonomische Modelle

Anhang A.1.5: Bericht zum Meilenstein 6

Ort: Stuttgart

Datum: Dezember 2023

Diese Arbeit wurde durch das BMWK gefördert.

© Fraunhofer ISI, IQIB GmbH, IER Universität Stuttgart, ZIRIUS Universität Stuttgart, IREES GmbH, Fraunhofer ISE, FCN RWTH Aachen University, IPMB TU Braunschweig (2023) Manifold. Einbindung von empirischem Input in techno-ökonomische Modelle. Bericht zum Meilenstein 6. Karlsruhe.

Impressum

MANIFOLD

Empirie und Modellschnittstellen: Ergebnisse

Autorinnen und Autoren

Institut für Energiewirtschaft und Rationelle Energieanwendung (IER), Universität Stuttgart

Audrey Dobbins, audrey.dobbins@ier.uni-stuttgart.de; Ulrich Fahl, ulrich.fahl@ier.uni-stuttgart.de; Kerstin Haller, kerstin.haller@ier.uni-stuttgart.de;

Institut für qualifizierende Innovationsforschung und -beratung (IQIB), Bad Neuenahr-Ahrweiler

Bert Droste-Franke, bert.droste-franke@iqib.de; Markus Voge, markus.voge@iqib.de

Institute for Future Energy Consumer Needs and Behavior (FCN), RWTH Aachen University

Christina Kockel, christina.kockel@eonerc.rwth-aachen.de; Jakob Kulawik, jakob.kulawik@eonerc.rwth-aachen.de

Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung ISI, Karlsruhe

Heike Brugger, heike.brugger@isi.fraunhofer.de; Alexandra Pröpper, alexandra.pröpper@isi.fraunhofer.de; Christiane Bernath, christiane.bernath@isi.fraunhofer.de

Institut für Ressourceneffizienz und Energiestrategien (IREES), Karlsruhe

Jan Steinbach, j.steinbach@irees.de

Fraunhofer Institut für Solare Energiesysteme (ISE), Freiburg

Charlotte Senkpiel, charlotte.senkpiel@ise.fraunhofer.de

Technische Universität Braunschweig, Institut für Psychologie, Abteilung für Psychologische Methodenlehre und Biopsychologie (IPMB)

Farina Wille, farina.wille@tu-braunschweig.de

Fördermittelgeber

Projektträger Jülich für das Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK)

Veröffentlicht

Dezember 2023

Hinweise

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 Auftraggebers wider.

Inhalt

Impressum	2
Abkürzungsverzeichnis.....	4
1 Einleitung	5
2 Modellintegration - Hintergrund und Methodik.....	6
3 Verbesserte Abbildung von Akteuren in Innovationsnetzwerken in bestehenden Energiesystemmodellen auf Basis von AP3 und AP5.....	11
3.1 Einordnung in den Kontext.....	11
3.2 Integration der SLICK-Ergebnisse in TAM-HHs.....	13
4 Verbesserte Abbildung von Akteuren in Diffusionsnetzwerken in bestehenden Energiesystemmodellen auf Basis von AP2 und AP5.....	17
4.1 Einordnung in den Kontext.....	17
4.2 Integration der DCE-Ergebnisse in TAM-HHs.....	19
5 Fazit	26
A.1 Modellbeschreibungen.....	27
A.1.1 Modellbeschreibung TAM-HHs.....	27
A.1.2 Modellbeschreibung SLICK.....	29
A.2 Modelltechnischer Ansatz SLICK – Kalibrierung und Szenarien	35
6 Abbildungsverzeichnis.....	41
7 Tabellenverzeichnis	42
8 Literaturverzeichnis	43

Abkürzungsverzeichnis

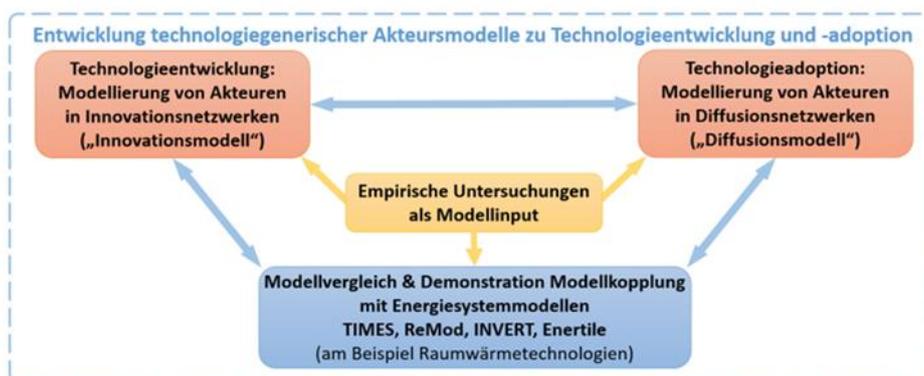
DCE	Discrete-Choice-Experiment
MANIFOLD	Modellentwicklung und Modellkopplung zu Akteursverhalten in Innovations- und Diffusionsnetzwerken
SLICK	Simulating Learning Curves via Knowledge modelling
TAM-HHs	TIMES Akteurs-Modell-Households

1 Einleitung

Das MANIFOLD-Dokument zum Meilenstein 6 dokumentiert die Ergebnisse der im Rahmen von MANIFOLD durchgeführten Analysen zum interdisziplinären Austausch zu Modellvergleich und -kopplung. Durch die im Projekt durchgeführten Analysen sollen die Energiesystemmodelle trotz ihres primär techno-ökonomischen Fokus darin befähigt werden, die Ergebnisse aus qualitativen und quantitativen empirischen sozialwissenschaftlichen Analysen auf geeignete Weise zu berücksichtigen. Der damit verbundenen Entwicklung der Akteursmodelle in MANIFOLD kommt dabei eine Schlüsselrolle in der Modellkopplung zu, da sie einerseits den empirischen Input aufnehmen und gleichzeitig auf den Output zur Kopplung bzw. Integration in techno-ökonomische Energiesystemmodelle ausgerichtet sind.

Zwei Akteursmodelle und ihre Verbindung zu techno-ökonomischen Energiemodellen stehen im Fokus von MANIFOLD (Abbildung 1). Im Ergebnis liefert ein Innovationsmodell (SLICK) Informationen über Auswirkungen implementierter Maßnahmen auf die zeitliche Verfügbarkeit und auf Lernkurven von Technologien, die als Input in Energiesystemmodelle und Diffusionsmodelle dienen. Darüber hinaus kann der abgeschätzte Wissensstand über innovative Technologien von Installateuren und Handwerkern genutzt werden, um die Modellierung der Technologiediffusion zu verbessern. Das Ergebnis des Diffusionsmodells (Mikroperspektivenmodell) mit den zugrundeliegenden Discrete-Choice-Experimenten ist die Marktdurchdringung von Technologien wie Heizungsanlagen, Anteile von Heizungsanlagen und Sanierungsraten auf Basis des Investitionsverhaltens unter bestimmten Bedingungen.

Abbildung 1: Entwicklung technologiegenerischer Akteursmodelle zu Technologieentwicklung und -adoption



Für den Bericht zum Meilenstein 6 wird aufgebaut auf dem bereits früh im Projekt im Meilenstein 3 entschiedenen Fokus auf der Modellkopplung und entsprechend definierten Schnittstellen (Bericht zum Meilenstein 5). Für den Meilenstein 6 ist im Gegensatz zu diesem Soft-Linking der endogene Ansatz der direkten Integration von Innovations- und Diffusionsaspekten in Energiesystemmodelle im Vordergrund. Wie können Informationen aus dem Innovationsmodell und dem Diffusionsmodell und den zugrundeliegenden empirischen Erhebungen direkt in Energiesystemmodelle integriert werden?

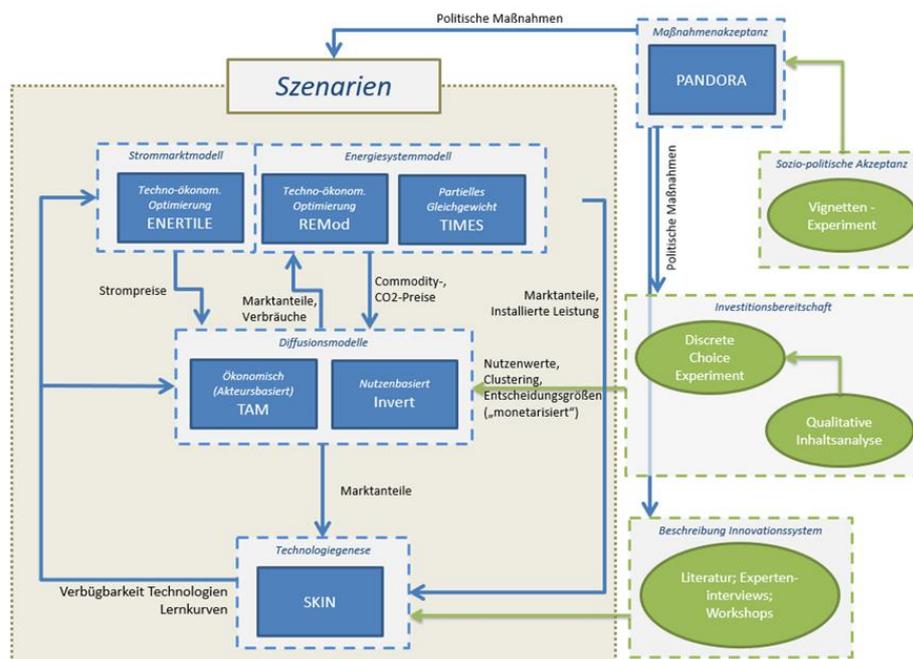
2 Modellintegration - Hintergrund und Methodik

Im Zuge der Energiewende und der realitätsnahen Modellierung von Transformationspfaden ist insbesondere auch die Integration menschlichen Verhaltens eine große Herausforderung (Pfenninger, S. et al., 2014). Dabei zeigen unterschiedliche Untersuchungen, dass dieses in den Energiesystemmodellen bislang noch nicht hinreichend abgebildet ist (Sovacool, B.K., 2014, Hodbod, J. et. Al., 2014), wenn es auch bereits Entwicklungen in diese Richtung gibt.

Mit der technologiegenerischen Ausrichtung der Akteursmodelle und ihrem Fokus auf Entscheidungsverhalten und Interaktion der Akteure geht einher, dass die spezifischen technologischen Details der betrachteten Innovationen nicht im Vordergrund stehen. Daher können die Akteursmodelle Fragen zu den Folgewirkungen der Entstehung und Diffusion bestimmter Technologien für das Energiesystem (bspw. Änderung der Stromnachfrage oder des CO₂-Ausstoßes durch die Diffusion von Elektrofahrzeugen) nicht direkt beantworten - für derartige Fragestellungen sind die techno-ökonomischen Energiesystemmodelle besser geeignet. Daher sollen die Akteursmodelle so aufgebaut werden, dass sie Output bereitstellen, der in möglichst vielen technoökonomischen Modellen mittels Modellkopplung als Input verwendet kann (z. B. Diffusionskurven mit zusätzlichen Informationen zu Präferenzen unterschiedlicher Adopter-Subgruppen), wie dies auch im Rahmen von MANIFOLD als zentraler Ansatz verwendet wird.

Die jeweiligen Schnittstellen und vorgesehenen Modellkopplungen, welche ein tieferes Verständnis für die systemischen Zusammenhänge des Energiesystems und einer Transformation desselben ermöglichen sollen, sind in Abbildung 2 dargestellt.

Abbildung 2: Modellschnittstellen und Modellintegration in MANIFOLD



Gemeinsam entwickelte Szenarien bilden den Rahmen für die Modellkopplung. Die Determinanten dafür werden so ausgewählt, dass sie den verschiedenen Modellen gemein sind. So werden die technologischen und wirtschaftlichen Annahmen zu Preisentwicklungen, Kostenentwicklungen, Lebensdauern oder Wirkungsgraden harmonisiert und mögliche Korridore und Preiselastizitäten bestimmt. Auch politische Rahmenbedingungen werden in den Szenarien definiert.

Neben den in großer Breite realisierten Modellkopplungen wurde in MANIFOLD auch untersucht, wie in Energiesystemmodellen aus Mikroperspektive sozialwissenschaftliche Aspekte direkt modellendogen integriert werden können. Dies ist der zentrale Aspekt des vorliegenden Berichts zum Meilenstein 6.

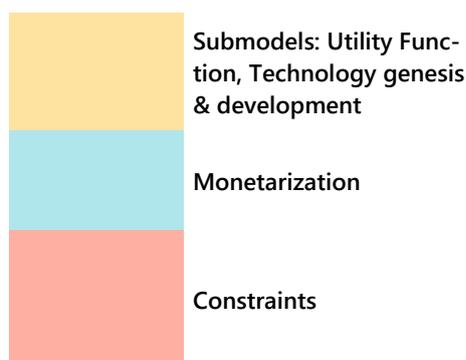
Der Fokus liegt dabei in der Forschung bislang darauf, wie das Investitionsverhalten der Akteure detailliert abgebildet werden kann. Der Schwerpunkt liegt dabei auf drei Kategorien: die Abbildung von Discrete-Choice-Experimenten, Umfrageergebnisse aus sozio-psychologischen Kategorien und die Abbildung von Entscheidungsfindungsprozessen (Senkpiel et al. 2020). In Tabelle 1 wird hervorgehoben, wie unterschiedliches Akteursverhalten in welcher Form in Energiesystemmodelle integriert werden kann. Dabei werden unterschiedliche Methodiken der Modellierung wie die Constraints, die Monetarisierung oder Lernkurven und Ober- und Untergrenzen von Technologien berücksichtigt. Auch ist es nur – höchstens teilweise – möglich, alle relevanten Faktoren wie auch soziale Faktoren in einem Energiesystemmodell zu berücksichtigen (Senkpiel et al. 2020).

Tabelle 1: Integration unterschiedlicher Aspekte in die Energiesystemmodellierung

Type of actor	Relevant aspect to be considered	Objective	Sample subjects from the heating sector	Form of acceptance / behavioral aspect	Integration into energy system models	Measurement / inquiry for relevant data
Consumer	Technology adoption: investment behavior	Investment behavior differs among groups depending on their demographics, attitude, persuasion, multi-stakeholders decision etc. Consideration of conviction, persistent tendency, image, technical limits, resources, and additional benefits	Choice between existing technologies, such as oil boilers and innovative ones such as heat pumps	Market acceptance	Willingness-to-pay	Empirical data on past investment behavior; surveys (e.g. DCE) on preferences regarding investments; studies on persistent tendency, elasticities in consumption, and knowledge about technologies; ego-centric network-analysis
					Consumer net utility; multicriteria optimization; diffusion models	
					Budget constraint; availability of technologies	
	Technology adoption: local acceptance	Inclusions of image, normatives, additional benefits, knowledge and trust	Local acceptance	Willingness-to-accept; willingness-to-participate	Empirical data, survey (e.g. DCE)	
					Distance control; ban of technologies; limits of distribution	

Type of actor	Relevant aspect to be considered	Objective	Sample subjects from the heating sector	Form of acceptance / behavioral aspect	Integration into energy system models	Measurement / inquiry for relevant data
Industry and investors	Behavioral aspects regarding technology use	<p>Consideration of realistic user patterns (driving patterns, heating patterns, etc.) to depict overall system effects; different user behavior, simultaneity, differences in geography</p> <p>Context structure of behavior (contextual / situational factors, lifestyle)</p> <p>Change / convertibility of consumer behavior</p>	<p>Heating behavior in dependence of consumer preferences (both in time and magnitude)</p> <p>New opportunities to provide flexibility by smart home technologies</p>	Behavior	<p>Consumer-specific time series</p> <p>Willingness-to-pay; willingness-to-accept</p>	Data aggregation based on measurement data or generic profiles considering different user behavior; surveys and empirical data on reactions (WTP, WTA) towards incentives for flexibility provision
	Technology genesis	R&D developments / time of technology genesis	Lead time for the development of innovative technologies such as fuel cells and heat pumps	Influenced by market acceptance	<p>Technology parameters; availability of new technologies</p> <p>Cost structure; availability of new technologies</p>	Technology learning curves
	Politics	Political strategy (measures) for new, innovative	The political strategy and promotion of technology enables a market	Incentives for environmentally friendly	Influenced by socio-political acceptance	Output of dynamic learning curves (LC)

Type of actor	Relevant aspect to be considered	Objective	Sample subjects from the heating sector	Form of acceptance / behavioral aspect	Integration into energy system models	Measurement / inquiry for relevant data
	technologies	formation (resource allocation, new actors and business creation)	technologies such as subventions for heat pumps		Laws, standards	Surveys of citizen opinions and preferences for political interventions; Analysis of public discourse e.g. comments of opinion leaders (NGOs, Lobby, political actors) in public media
	Political strategy (measures) for existing technologies	Compulsory connection, bans, new construction, standards	Ban of old heating technologies such as oil boilers	Influenced by socio-political and local acceptance		



Für den Bericht zum Meilenstein 6 steht somit die Frage im Vordergrund, ob und wie sozialwissenschaftliche Faktoren über Parametrisierungen direkt in die Energiemodelle integriert werden können. Durch diesen Ansatz sollen die methodischen Vorteile von Akteursmodellen in den techno-ökonomischen Modellen zur Energiesystemanalyse genutzt werden können. Die Diskussion dieser Fragestellung erfolgt beispielhaft für das Energiemodell TAM-Households (TIMES Akteurs-Modell-Households (TAM-HHs), siehe Abschnitt A.1.1 im Anhang).

Zunächst wird hierfür analysiert und dargestellt, wie unterschiedliche Input-Faktoren in der Modellierung in TAM-HHs geclustert und berücksichtigt werden können.

1. Technologieadaption / Investitionsverhalten

Das Investitionsverhalten bzw. die Technologieadaption wird über unterschiedliche Marktanteile aus dem Discrete-Choice-Experiment, unterschiedliche Technologiecharakterisierungen und Technologieentwicklungen sowie die Entwicklung und den Zugang zu Energieträgern und Netzwerken dargestellt. Die Umsetzung in TAM-HHs kann über profilspezifische User Constraints, Budget Constraints, Discount Rates oder technologiespezifische User Constraints, obere und untere Grenzen für mögliche Marktanteile von Technologien (z. B. Technologie x), erfolgen. Dazu kommen Annahmen für konkurrierende Technologien (z. B. Technologie x+), die Verfügbarkeit von Fernwärme und Gas für bestimmte Zeiträume, sowie das Potenzial für PV-Anlagen, Wärmepumpen und Geothermie nach unterschiedlichen Akteursgruppen.

2. Lokale Akzeptanz von Technologien

Die sogenannte lokale Akzeptanz von Technologien, die "Willingness to accept", kann über ein benutzerspezifisches Investitionsverhalten abgebildet werden, das über sozioökonomische Faktoren und den Gebäudetyp dargestellt wird. In TAM-HHs kann die Implementierung über profilspezifische User Constraints, Budget Constraints und Discount Rates und technologiespezifische User Constraints erfolgen. Das "Zögern" und eine mögliche Zurückhaltung gegenüber (neuartigen) Technologien kann über monetäre Begrenzungen (Hurdle Rates, Discount Rates) dargestellt werden.

3. Verhaltensaspekte in Bezug auf die Technologienutzung

Verhaltensaspekte in Hinblick auf eine Technologienutzung umfassen den Verbrauch, die Entwicklung von Technologietreibern, Rebound-Effekten und Suffizienz. Weiter kommen auch Politikmaßnahmen und Aspekte wie Energieeffizienz, Anforderungen und die Technologieentwicklung dazu. In TAM-HHs kann dies über eine profilspezifische Energienachfrage je Endnutzer nach Gebäudetyp umgesetzt werden. Die Nachfrage je Endnutzung ist nach Gebäudetyp und Akteursgruppe differenziert, sodass auch Aspekte wie Rebound und Suffizienz mitbetrachtet werden können.

4. Technologiegenese

Im Rahmen der Technologiegenese erfolgt die Charakterisierung der Technologien sowie spezifischer Politiken und Maßnahmen (z. B. für spezifische Technologien). Diese Aspekte können in TAM-HH über die Verfügbarkeit von Technologien sowie Constraints Eingang finden, um bestimmte Technologien generell oder für bestimmte Akteursgruppen zwangsweise zu nutzen.

5. Soziopolitische Rahmenbedingungen

Soziopolitische Rahmenbedingungen wie übergeordnete Politikmaßnahmen können ebenfalls in die Modellierung mit einbezogen werden. Je nach Zielgruppe werden Constraints implementiert, um die Ziele zu erreichen. Dabei sind die Constraints unterschiedlich je nach Akteur oder Technologie (z. B. Gebäudeeigentümer, Technologie oder Energieträger. Zudem können Subventionen, Steuern pro Technologie, Energieträger nach Akteursgruppe berücksichtigt werden und die Implementierung, falls nötig, über User Constraints erfolgen.

Von diesen Optionen wird in Abschnitt 3 die endogene Behandlung von Akteuren in Innovationsnetzwerken und in Abschnitt 4 die endogene Integration von Diffusionsaspekten in Energiemodelle behandelt.

3 Verbesserte Abbildung von Akteuren in Innovationsnetzwerken in bestehenden Energiesystemmodellen auf Basis von AP3 und AP5

3.1 Einordnung in den Kontext

In Energiesystemmodellen wird bislang die Entstehung von Technologien typischerweise nicht explizit erfasst, sondern über mögliche Technologieoptionen und ihre technisch-ökonomische Charakterisierung im Zeitverlauf exogen vorgegeben.

Dabei gibt es in Bezug auf Lernkurven langjährige Erfahrungen mit entsprechenden Ansätzen. Grundsätzlich werden durch den Lernprozess unterschiedliche Faktoren wie Wissen, Erfahrung und Leistung optimiert, die sich damit auch auf Technologiepreise auswirken. Dabei wird unterschieden zwischen Ein-Faktor-Lernkurven und Zwei-Faktor-Lernkurven. Der Grundgedanke der Ein-Faktor-Lernkurve besteht darin, dass ein quantitativer Zusammenhang zwischen den Investitionskosten einer Technologie und ihrer bereitgestellten Kapazität hergestellt wird. Im Gegensatz dazu werden beim Ansatz der Zwei-Faktor-Lernkurven zwei Hauptfaktoren, die die Investitionskosten einer Technologie beeinflussen, bei der Modellierung in den Fokus gerückt – die Ausgaben für Forschung und Entwicklung sowie die kumulierten Kapazitäten. Somit werden die spezifischen Technologiekosten in Abhängigkeit der kumulierten Kapazitäten und Ausgaben für Forschung und Entwicklung ausgedrückt (Rout 2007).

Insgesamt steht jedoch in Energiesystemmodellen die Fragestellung im Fokus, wie eine kostenoptimale Lösung unter den gegebenen Rahmenbedingungen aussehen kann. Der Fokus liegt bei Optimierungsmodellen zumeist nicht darauf, das Verhalten eines einzelnen Akteurs explizit abzubilden (Senkpiel et al. 2020). Dabei werden die Einflüsse von Wissen und Netzwerken meistens nur implizit über die techno-ökonomischen Parameter berücksichtigt, aber nicht explizit darauf basierende Lernkurven vorgegeben.

Aufbauend auf den Arbeiten in AP 3 und AP 5 werden in diesem Abschnitt verschiedene Ansätze zur Abbildung von Wissen und Netzwerken und ihres Einflusses auf die Technologieentstehung diskutiert und eine beispielhafte Implementierung in Energiesystemmodellen umgesetzt. Mögliche Ansätze können z. B. die zusätzliche Berücksichtigung von Wissen als eine Commodity in den Modellen sein, die Etablierung einer oder mehrerer sog. Backstop-Technologien, die unterschiedliche Charakteristika aufweisen und die sich aus diesem Wissen speisen, oder die Abbildung unterschiedlicher Technologievarianten, die ein unterschiedliches Maß an Wissen beinhalten. Grundsätzlich kann auf Vorarbeiten im Forum für Energiemodelle und Energiewirtschaftliche Systemanalysen in Deutschland (Modellforum) und dem Modellexperiment (MEX) V zur Einbeziehung von Innovationen in Energiemodelle aufgebaut und zurückgegriffen werden, die nun auch auf den Bereich Raumwärme übertragen werden können.

Grundsätzlich wurden für das Energiesystemmodell TIMES bereits im MEX V Wirkzusammenhänge zwischen den Ausgaben für Forschung und Entwicklung und den techno-ökonomischen Eigenschaften einer Technologie hergestellt. Allerdings erfolgte im Rahmen dieser Untersuchung das sogenannte learning-by-searching, während die Verbesserung der Technologien in ihrer Nutzung und Herstellung ausgeklammert wurden. Die weiterführenden Arbeiten in MANIFOLD werden nun in den weiteren Abschnitten vorgestellt.

Bereits im Modellforum MEX V wurde wissenschaftlich untersucht, welcher Zusammenhang zwischen den F&E-Ausgaben und dem Einfluss von learning-by-searching besteht. Der grundsätzliche

Ansatz dabei war, dass Ausgaben für F&E einerseits einen Effekt haben auf die spezifischen Investitionskosten und andererseits auch zu besseren technischen Eigenschaften wie der Senkung der Emissionen oder der Erhöhung des Wirkungsgrades führen können. Im Zuge der Untersuchungen erfolgte eine Analyse der Szenarien mit Endogenisierung von F&E-Entscheidungen. Dabei wurde jedoch insgesamt eher der Einfluss auf herkömmliche Technologien untersucht, während hier der Fokus im Projekt auf Wärmepumpen und Brennstoffzellen liegt. Zudem wurden dort nur F&E-Einflüsse untersucht, ein Vergleich mit einem Investitionsbudget für eine verstärkte und fokussierte Handwerker Ausbildung und Subventionen erfolgte nicht.

Insgesamt bietet die Endogenisierung von F&E im Energiesystemmodell Untersuchungsmöglichkeiten zur grundsätzlichen Struktur, zu den Kosten und Emissionen und den Auswirkungen unterschiedlicher F&E-Anstrengungen auf unterschiedliche Technologien. Insgesamt bietet das dargelegte theoretische Konzept der Integration von Lernkurven in die Energiesystemmodellierung neue Erkenntnisse.

Der Fokus der Betrachtung in MANIFOLD ist die Definition der notwendigen Input-Größen von SLICK als Input in TAM-HHs. Das Modell SLICK wird im Abschnitt A.1.2 im Anhang vorgestellt. Grundsätzlich kann für die Integration der Ergebnisse aus SLICK folgendes Vorgehen methodisch durchgeführt werden: Inwieweit wirkt sich eine unterschiedliche Aufteilung des Budgets für Installateure, Subventionen und Ausgaben für F&E für Brennstoffzellen und Wärmepumpen auf die Modellierungsergebnisse von TAM-HHs aus?

Als Vorbereitung der Integration der SLICK-Ergebnisse in TAM-HHs erfolgte zunächst eine Harmonisierung und geeignete Anpassung der jeweiligen techno-ökonomischen Parameter, insbesondere für die Harmonisierung der Preise für Wärmepumpen und Brennstoffzellen. Dazu erfolgte die Erstellung eines Datentemplates zur geeigneten Übergabe und Harmonisierung der ausgewählten wichtigsten Kenngrößen. Unterschiedliche Möglichkeiten zur Untersuchung der einzelnen Effekte wurden bereits früh im Projektverlauf diskutiert.

Zur konkreten Umsetzung der Modellintegration war es zunächst notwendig, das Modell TAM-HHs um die Brennstoffzellentechnologien als Optionen zu erweitern sowie rekursiv geeignete Untersuchungs- und Vergleichsgrößen zu definieren.

Dazu wurden in Abhängigkeit der unterschiedlichen Szenarien (siehe Abschnitt A.2 im Anhang) die Aufteilungen eines unterschiedlichen Budgets in die drei Schwerpunktpfade F&E, Subventionen und Handwerker berechnet. Es erfolgte eine Harmonisierung der jeweiligen Technologiepreise, Subventionen werden beispielsweise über niedrigere Preise abgebildet.

Durch die beschriebene Vorgehensweise bestand die Möglichkeit, gezielt zu untersuchen, welche Effekte und Nutzen mit unterschiedlichen Aufteilungen eines Gesamtbudgets zur Förderung verbunden sind und wie unter den gegebenen Rahmenbedingungen die Ziele kostenoptimal erreicht werden können.

Der Fokus liegt dabei auf Marktanteilen, Technologiepreisen und Effizienzverbesserungen.

- Marktanteile
 - Um Infrastrukturverbesserungen abbilden zu können, werden in SLICK Marktanteile gesteigert. Diese können in der Charakterisierung der unterschiedlichen Profile in TAM-HHs für Stadt/Land, Gebäudetyp und ihren jeweiligen Zugang zur Energieinfrastruktur entsprechend abgebildet werden.
 - In TAM-HHs werden Marktanteile durch Infrastrukturlimitierungen nach Gebäudetyp und der Verfügbarkeit von Energieversorgungsarten (z. B. Gasnetz, PV-Potenzial, Wärmepumpeninstallation) bestimmt.
- Technologiepreise und Effizienzverbesserungen

- In TAM-HHs werden die Preise für Heizungstechnologien bestimmt als die gesamten Anschaffungskosten für Verbraucher. Diese umfassen Investitionskosten, Installationskosten, ggf. Renovierungskosten und weitere anteilige Preiskomponenten.
- Die Kostendaten und -informationen aus SLICK werden in TAM-HH innerhalb der disaggregierten Preiskomponenten berücksichtigt. Auf diese Weise wird der Einfluss unterschiedlicher Preise erhöht z. B. durch geringere Arbeitskosten oder höhere Materialkosten. So kann das Verbraucherverhalten realitätsnäher im Modell abgebildet und untersucht werden.

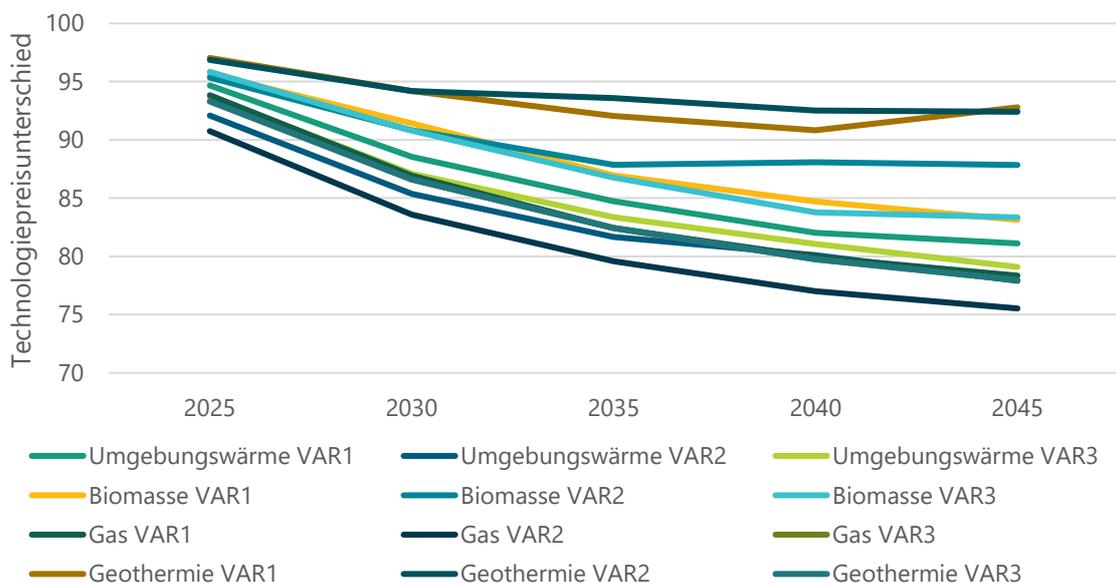
3.2 Integration der SLICK-Ergebnisse in TAM-HHs

Um den unterschiedlichen möglichen Marktanteile Rechnung zu tragen, die sich daraus ergeben, wo der Schwerpunkt des Budgets liegt, kann die Spanne der möglichen Installationen als untere und obere Grenze in TAM-HHs vorgegeben werden. Die Untergrenze entspricht dem theoretisch Möglichen, die Obergrenze den infrastrukturellen Einschränkungen (z. B. Zugang) im Vergleich zu 2020 für jedes der 112 in TAM-HHs definierten Profile. Die Marktanteile aus SLICK für die Untergrenze wurden bei der Modellintegration in TAM-HHs nicht berücksichtigt, weil die Steuerung der Investitionsentscheidungen über die Bezahlbarkeit der Technologien läuft und weil Haushalte, die sich eine bestimmte Technologie nicht leisten können (durch die Budgetrestriktionen in TAM-HHs definiert), nicht gezwungen werden können, eine bestimmte Investition zu unternehmen. Zusammen mit den jeweils unterschiedlichen Technologiepreisen, die als Ergebnis aus SLICK an TAM-HHs übertragen werden, wurden vier Szenarien gerechnet (Referenzszenario (REF), Variation 1 (VAR1), Variation 2 (VAR2) und Variation 3 (VAR3)). Bei allen Szenarien sind die ansonsten zugrunde liegenden Annahmen gleich: Dekarbonisierung bis 2045, Diskontsatz, Energie- und CO₂-Preise, Budget Constraints, sozioökonomische Rahmenbedingungen (Anzahl Haushalte nach Einkommen, Gebäudetyp, und Urbanisierung). Die differenzierten Technologiepreise in den drei Variationen werden als Beispiel für 2035 in Tabelle 2 aufgezeigt und in Abbildung 3 für die Entwicklung zwischen 2025 und 2045 dargestellt. Diese Zahlen wurden in TAM-HHs auf die jeweiligen 112 Profile angepasst.

Tabelle 2: Szenarioübersicht SLICK mit TAM-HHs: Technologiepreise 2035 - Durchschnittlicher Unterschied zum Referenzpreis 2020 (2020=100)

Szenario	Variation 1 (VAR1)	Variation 2 (VAR2)	Variation 3 (VAR3)
Umgebungswärme	84.7	81.7	83.4
Biomasse	87.0	87.9	86.8
Gas	82.4	79.6	82.4
Geothermie	92.1	93.6	82.4

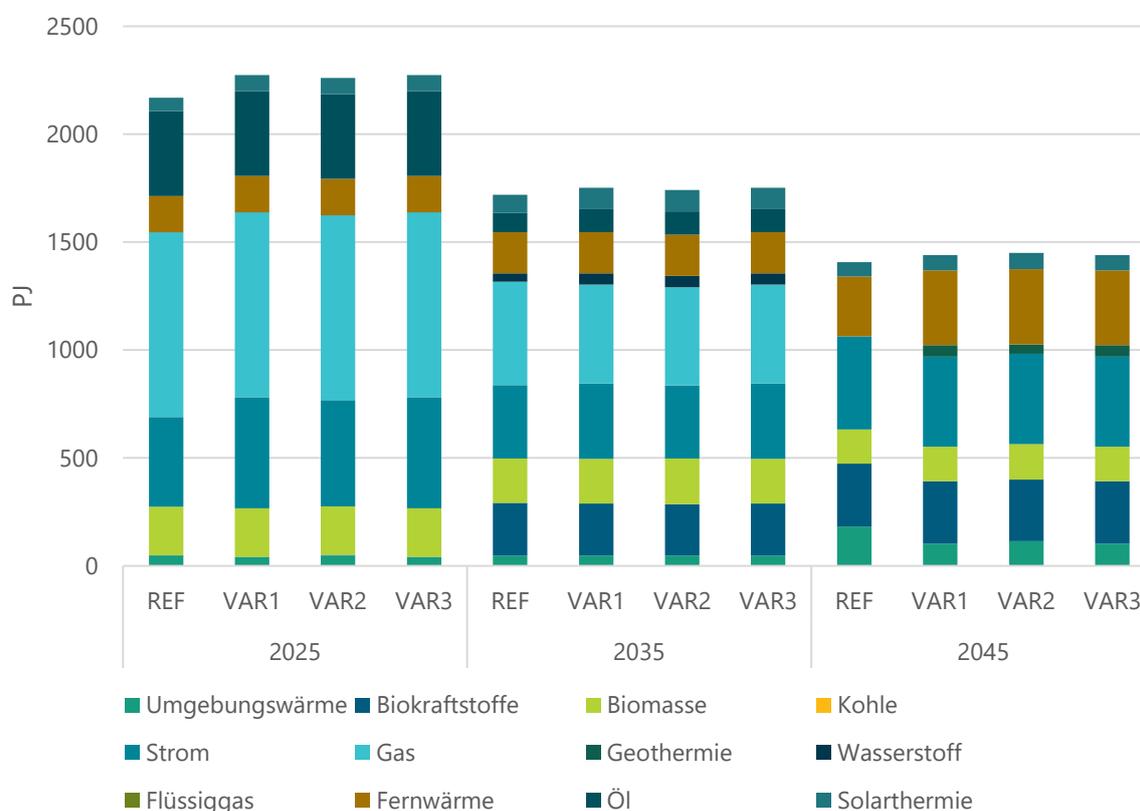
Abbildung 3: Technologieunterschiede nach Szenario



Endenergieverbrauch der Haushalte nach Energieträgern

Durch die Integration differenzierter Technologiepreise variieren die Unterschiede auf Ebene des gesamten Endenergieverbrauchs der Haushalte in Deutschland zwischen den Szenarien kaum, wie in Abbildung 4 zu sehen ist. Kurzfristig (2025) zeigt das Referenzszenario einen geringeren Gesamtendenergieverbrauch. Dies ist darauf zurückzuführen, dass die Kosten für den Austausch von Technologien, insbesondere für Haushalte mit geringerem Einkommen, generell eine wesentliche Hürde darstellen. Im Jahr 2045 weist das Referenzszenario in der Energieträgerstruktur im Vergleich zu den anderen drei Varianten weniger Geothermie, aber mehr Solarthermie auf. Variante 2 verursacht im Jahr 2045 die geringsten Emissionen durch die Integration eines größeren Fernwärmeanteils und geringerer Biomasseanteile, gegeben durch die höheren Investitionskosten für alternative Technologien im Vergleich zu den anderen Varianten. Insgesamt ist die Abweichung zwischen den Szenarien aber wenig stark ausgeprägt.

Abbildung 4: Endenergieverbrauch der Haushalte nach Energieträgern und Technologiepreis-Szenario, 2025-2045



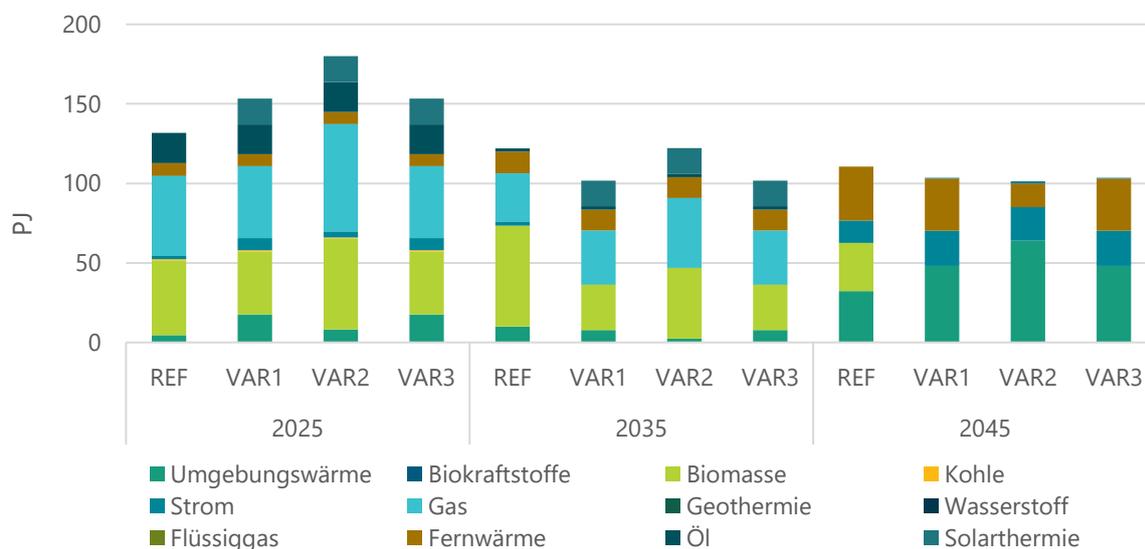
Endenergieverbrauch für Raumwärme und Warmwasser

In TAM-HHs kann auch der Einfluss derartiger Veränderungen bei den Technologiepreisen auf einzelne Haushaltsgruppen bzw. -profile, wie z. B. die Eigentümer von Einfamilienhäusern, untersucht werden. Abbildung 5 zeigt den Endenergieverbrauch für Raumwärme und Warmwasser in Einfamilienhäusern mit Eigentümern der Einkommensgruppe >5000 Euro pro Haushalt und Monat. Hier machen sich nun doch deutlicher Unterschiede bemerkbar, die auf die Veränderungen in den Tech-

nologiepreisen zurückgeführt werden können. So sind z. B. Technologien auf der Basis von Biomasse und Gas im Szenario VAR2 deutlich günstiger und werden entsprechend in 2025 und 2035 häufiger eingesetzt.

Der Preis der Technologien treibt eindeutig die Investitionen an. Verbraucher treffen Investitionsentscheidungen auf der Grundlage der kurzfristigen Vorabinvestitionskosten für eine neue Anlage sowie der längerfristigen Auswirkungen der Betriebskosten, die von der Effizienz, der Art des Brennstoffs und den erwarteten Energie- und CO₂-Preisentwicklungen abhängen. Die optimalen Investitionsentscheidungen sind komplex und unterliegen auch den auf dem Markt angebotenen Technologien und Fortschritten sowie der Fähigkeit der Haushalte, auf Fachkräfte für die Installation und Wartung von Technologien zuzugreifen. Solche Überlegungen beeinflussen auch die Präferenzen der Haushalte für bestimmte Technologien. An dieser Stelle lohnt es sich in Energiesystemanalysen einzelne Akteursgruppen zu differenzieren und nicht zu pauschalisieren, um die Heterogenitäten im Haushaltssektor erfassen zu können.

Abbildung 5: Endenergieverbrauch für Raumwärme und Warmwasser in Einfamilienhäusern mit Eigentümern der Einkommensgruppe >5000 Euro pro Haushalt und Monat



4 Verbesserte Abbildung von Akteuren in Diffusionsnetzwerken in bestehenden Energiesystemmodellen auf Basis von AP2 und AP5

4.1 Einordnung in den Kontext

Fragen der Akzeptanz und Akzeptabilität von Technologien werden in Energiesystemmodellen neben der Modellierung von sektor- bzw. technologie-spezifischen Diskontraten typischerweise über sog. Intangible Costs (Kosten durch Einschränkungen bzw. Unannehmlichkeiten) oder über Ansätze des Willingness-to-pay (Zahlungsbereitschaft) bzw. Willingness-to-accept erfasst (Senkpiel et al. 2020). Daneben können heterogene Nutzer-Gruppen (z. B. unterschiedliche Adoptionsgeschwindigkeiten) eine verbesserte Abbildung der Technologiediffusion ermöglichen, die um die Berücksichtigung von Intermediären, wie z. B. Installateure und Händler, oder auch sog. Change Agents, wie z. B. Meinungsführer, Multiplikatoren, weiter differenziert werden kann. Im Rahmen der Arbeiten zum vorliegenden Meilenstein-Dokument 6 wurden, aufbauend auf den Arbeiten in den MANIFOLD AP 2 und AP 5, die unterschiedlichen Optionen geprüft, inwieweit sie zum einen systematisch datentechnisch fundiert werden können, und inwieweit sie zum anderen relevant in Bezug auf die Technologiediffusion erscheinen und damit in den Energiesystemmodellen umgesetzt werden könnten und sollten. Die Durchführung des Discrete-Choice-Experiments wurde umfassend im Meilenstein-Dokument 5 beschrieben. Ebenso wurde dort bereits dargelegt, welche der ausgewählten soziodemografischen Faktoren in die Energiesystemmodelle Eingang finden können.

Bereits bei der Konzeptionierung des Discrete-Choice-Experiments (DCE) erfolgte die Aufteilung der einzelnen Gruppen in geeigneter Weise möglichst analog zur Disaggregation der Akteursgruppen in TAM-HHs in 112 Haushaltsprofile. Auf diese Weise konnte sichergestellt werden, dass die Informationen der einzelnen Attribute aus dem DCE dann Eingang in unterschiedliche Szenarien in TAM-HH finden können. Zudem wurde der Einfluss der im Meilenstein-Dokument 5 dargelegten Attribute eruiert und die geeignete Abbildung in TAM-HHs untersucht. Die Willingness-to-pay im Zusammenhang mit Transformationen im Energiesystem wurde bereits mehrfach mit jeweils spezifischem Fokus untersucht und ermittelt (Kim et. al., 2020, Numata et. al., 2021), jedoch liegt der Fokus nun auf der Integration der Ergebnisse in das Energiesystemmodell TAM-HHs.

Grundsätzlich ist es denkbar, sämtliche untersuchten Attribute über geeignete, spezifische Methoden der Budget Constraints in TAM-HHs abzubilden. Dabei können jedoch nur die unterschiedlichen Kombinationen und Attribute verwendet werden, deren Stichproben einerseits genügend groß waren und sich andererseits mit den bereits in TAM-HHs vorgehaltenen Akteursgruppen decken.

Zur Definition einer Schnittstelle zwischen den Ergebnissen des DCE und TAM-HHs wurden zunächst iterativ die relevantesten Indikatoren herausgearbeitet und dann die Interpretation der Zahlungsbereitschaft und Integration in das Energiesystemmodell diskutiert. Dies war bereits in die Ausgestaltung des Experiments mit eingeflossen.

Das Discrete-Choice-Experiment umfasst neben der Zahlungsbereitschaft zur Recherche und den Betriebs- und Investitionskosten insbesondere auch einen Indikator zur CO₂-Emissionsreduktion, der sich als Indikator zur Zahlungsbereitschaft und Integration in TIMES eignet: Dazu erfolgte eine Bewertung der einzelnen Technologien im Vergleich zur Referenztechnologie eines Gas-Brennwertkessels und damit eine monetäre Bewertung im gleichen Verhältnis wie die CO₂-Emissionsreduktion. Somit wurden die einzelnen Heizsysteme jeweils mit einem Bonus bzw. Malus ausgestattet.

Auch für die weiteren Indikatoren aus dem DCE (siehe Tabelle 3) sind analoge Bonus- bzw. Malus-Belegungen umsetzbar.

Tabelle 3: Ergebnisse des Discrete-Choice-Experimentes der Pilotstudie für die gesamte Stichprobe als Willingness-to-pay

Attribut	β	p-Wert	Zahlungsbereitschaft ¹⁾	Interpretation
CO₂-Emissionsreduktion	-0,008	0,0000	60,15	EUR Zahlungsbereitschaft für ein Prozent CO ₂ -Reduktion im Vergleich zu Erdgas
Eigenrecherche	0,169	0,0000	-1270,68	EUR Zahlungsbereitschaft im Vergleich zu Informationsbezug vollständig durch Fachinstallateur
Eigenrecherche - Fachinstallateur	0,263	0,0000	-1977,44	
Fachinstallateur – Eigenrecherche	0,143	0,0000	-1075,19	
Betriebskosten	-1856	0,0000	13,95	EUR Zahlungsbereitschaft für Senkung der jährlichen Betriebskosten um einen EUR
Politiksignal	-0,536	0,0000	4030,08	EUR erhöhte Zahlungsbereitschaft für positives politisches Fördersignal
Betriebsaufwand	0,062	0,0000	466,17	EUR für Senkung des jährlichen zusätzlichen Betriebsaufwands um eine Stunde

¹⁾ Alle Zahlungsbereitschaften sind immer als trade-off zu den Investitionskosten zu verstehen. Bsp.: 20 € höhere Investitionskosten werden akzeptiert (bzw. es herrscht eine Bereitschaft, diese zu zahlen), wenn dadurch eine Senkung der jährlichen Betriebskosten um 1 € erreicht wird.

Auf diese Weise können die DCE-Ergebnisse in die Energiesystemmodellierung mit einbezogen werden. Insgesamt können so in der disaggregierten Modellierung einerseits realitätsnäher die einzelnen relevanten Akteure dargestellt werden und andererseits die Umfrageergebnisse des DCE mitberücksichtigt werden. Auf der anderen Seite wurden Informationen zur Zahlungsbereitschaft für die Attribute Eigenrecherchen, Fachinstallateur*in, Energieberatung und Zeitaufwand nicht bei der Modellintegration berücksichtigt. Hier bedarf es noch konzeptioneller Überlegungen, wie ein direkter Transfer in techno-ökonomische Energiemodelle erfolgen könnte.

Basierend auf den Ergebnissen zur Zahlungsbereitschaft für unterschiedliche Attribute von Heizungstechnologien im Bereich der Einfamilienhäuser wird nun im nächsten Abschnitt das Konzept zur Integration in TAM-HH diskutiert.

4.2 Integration der DCE-Ergebnisse in TAM-HHs

Die Ergebnisse der empirischen Erhebung im DCE zu den Zahlungsbereitschaften fließen in die Szenarienmodellierung in TAM-HHs ein, indem die Daten verwendet werden, um individuelle Entscheidungskalküle der Gebäudeeigentümer zu berücksichtigen und damit Entwicklungen der Marktanteile unterschiedlicher Wärmeversorgungstechnologien verbessert abschätzen zu können. Strukturelle Unterschiede der Nutzerpräferenzen in Abhängigkeit des jeweiligen soziodemographischen Hintergrundes werden dabei durch eine Betrachtung unterschiedlicher Cluster berücksichtigt. Die übergebenen Daten enthalten aus diesem Grund neben den Ergebnissen für die gesamte Stichprobe auch Ergebnisse für folgende ausgewählte soziodemographischen Faktoren:

- Stadt-Land
- Eigentümer-Mieter
- Nettohaushaltseinkommen

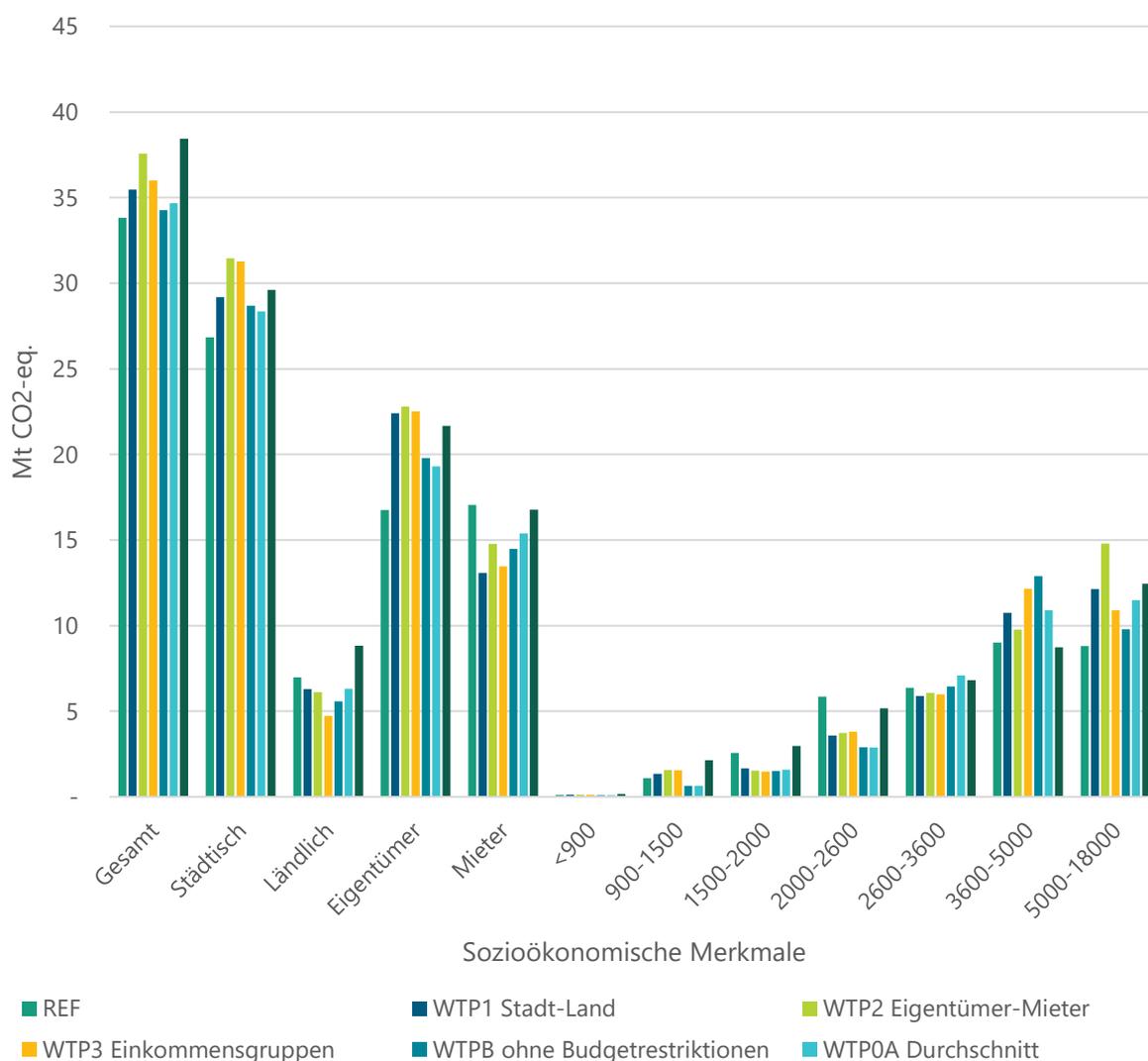
Im Modell TAM-HHs, in dem eine Disaggregation der Akteure vorhanden ist, werden diese soziodemographischen Faktoren modellendogen mitberücksichtigt. Grundsätzlich wird z. B. die Willingness-to-pay (WTP) nach diesen Merkmalen zusammen mit der methodischen Erweiterung der Energiesystemoptimierungsmodell-Methodik der Budget Constraints integriert.

In TAM-HHs wurden verschiedene Varianten berechnet, um die Auswirkungen der DCE-Ergebnisse und ihre Integration in das Energiesystemmodell zu evaluieren. Im Vergleich zum Referenzszenario (REF) wurden fünf weitere Szenarien berechnet, die den Willingness-to-Pay (WTP) Fokus auf verschiedene sozio-ökonomische Merkmale legt: WTP0A (Durchschnittliche Willingness-to-Pay ohne Bezugnahme auf spezifische sozio-ökonomische Merkmale), WPT1 (Stadt-Land), WTP2 (Eigentümer-Mieter), WTP3 (Einkommensgruppen) und WTPB (Willingness-to-Pay ohne Budgetrestriktionen). Zusätzlich wurde noch diese Integration von WTP-Faktoren damit verglichen, direkt in der Modellierung eine andere – höhere – Diskontrate zu nutzen, die implizit Präferenzen und Fragen der Bezahlbarkeit repräsentiert (WTBK).

Vergleich der WTP-Szenarien am Beispiel der Treibhausgasemissionen nach sozioökonomischen Merkmalen

Der erste in Abbildung 6 dargestellte Vergleich der Effekte der Integration von WTP-Faktoren in das Modell TAM-HHs zeigt eine Übersicht über den Einfluss von verschiedenen WTP-Parametern auf die Treibhausgasemissionen in Haushalten nach sozioökonomischen Merkmalen und WTP-Szenarien für das Jahr 2035. Dies zeigt den Einfluss der WTP-Faktoren auf die Technologiepreise und die daraus resultierenden Emissionen auf Basis der getätigten Investitionen. Es ist auch möglich, den Einfluss spezifischer WTP-Eingabedaten auf Merkmale zu vergleichen, die nicht für diese WTP spezifisch sind, und ermöglicht eine Analyse, ob spezifische oder allgemeine WTP nützlich und notwendig sind, um die langfristigen Auswirkungen auf Investitions- und Konsummuster zu analysieren. Der WTP-Parameter für Stadt-Land (WTP1) führt durchweg zu höheren Emissionen im Vergleich zum Referenzszenario, während die WTP-Szenarien im Übrigen über die verschiedenen sozioökonomischen Merkmale hinweg ähnlichen Mustern folgen. Um die Unterschiede besser zu verstehen, werden sie einzeln weiter bewertet.

Abbildung 6: Übersicht zum Einfluss von WTP-Parametern auf die Treibhausgasemissionen der Haushalte nach sozioökonomischen Merkmalen und WTP-Szenarien im Jahr 2035

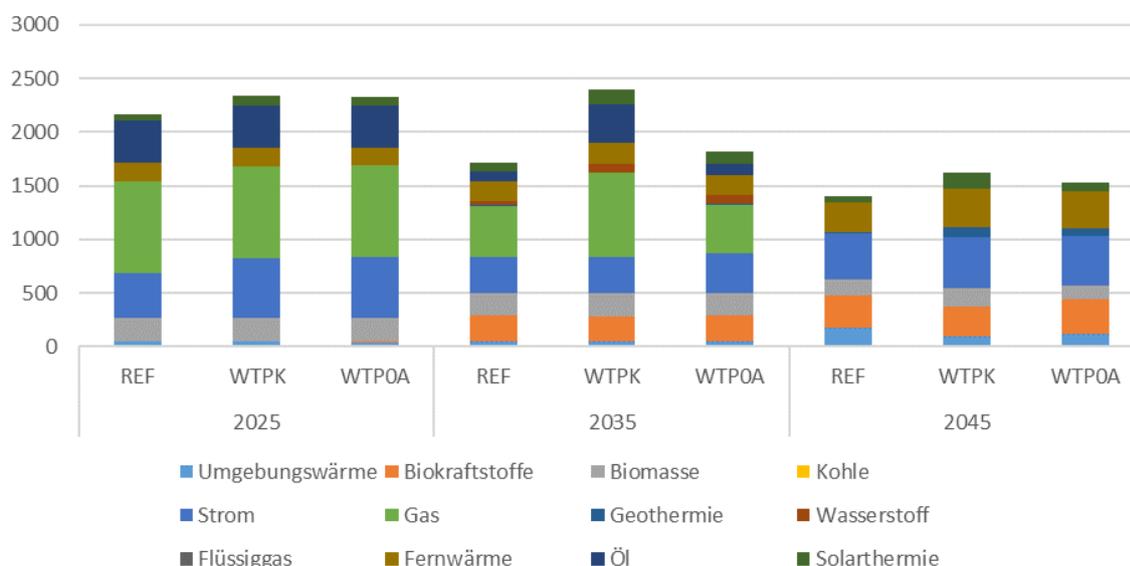


Einfluss der Diskontrate (WTPK) auf den gesamten Endenergieverbrauch der Haushalte

Die Integration der WTP-Ergebnisse in TAM-HHs wurde implementiert, indem diese mit den Installationskosten der Heiztechnologien entsprechend den spezifischen sozioökonomischen Parametern überlagert wurden. Diese Methode wurde auch mit der gängigeren Methode verglichen, die WTP durch eine Variation des Diskontsatzes zu berücksichtigen, um die Erschwinglichkeit oder Präferenzen widerzuspiegeln. In diesem Szenario mit Variation der Diskontierung (WTPK) wurde der Diskontsatz entsprechend den Erwartungen der Verbraucher in Bezug auf die finanzielle Unterstützung (d. h. den Betrag, den die Verbraucher für Investitionen zu zahlen bereit sind) gesenkt.

Kurzfristig unterscheiden sich die Investitionen nicht wesentlich, da noch keine neuen Investitionen erforderlich sind, siehe Abbildung 7. Mittelfristig erreichen die meisten Heiztechnologien jedoch das Ende ihrer technischen Lebensdauer und müssen ersetzt werden. Der Unterschied in der Methodik wird im Jahr 2035 deutlich. Das Referenzszenario enthält profilspezifische Budgetbeschränkungen und Umsetzungsbeschränkungen aufgrund der Infrastruktur und des Zugangs zu den Netz- und Ressourcenpotenzialen. Die Budgetbeschränkungen beschränken die Investitionen auf das für jedes Profil verfügbare Kapital. Dies spiegelt sich in den Ergebnissen des Referenzszenarios wider, in dem der Verbrauch in den Jahren 2035 und 2045 im Vergleich zu den beiden anderen Szenarien geringer ist. Die Haushalte sind nicht in der Lage, sich die Konsumausgaben zusätzlich zu den hohen Vorlaufkosten zu leisten, und schränken daher sowohl den Konsum als auch neue Investitionen mittelfristig ein. Trotz des niedrigeren Diskontsatzes im WTPK-Szenario wird die Hürde für Investitionen in neue oder andere Technologien nicht so weit gesenkt, dass die Haushalte Investitionen tätigen. Hier bleiben die Investitionen mittelfristig bei bekannten Technologien, wie z. B. Gas, obwohl diese im Jahr 2045 nicht mehr nutzbar ist. Dieses Phänomen der Verharrung ist auch oft in der Literatur als Erklärungsansatz zu finden (Senkpiel et al. 2020, REEEM 2019).

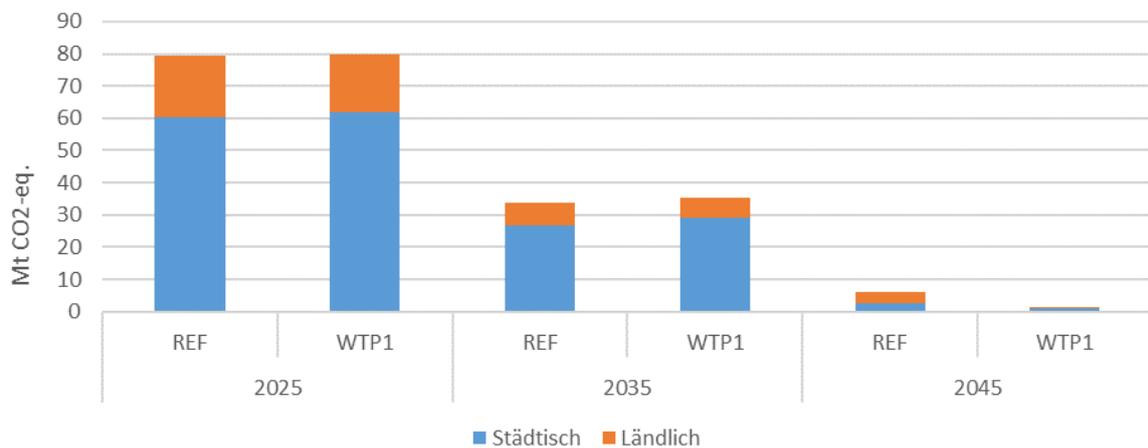
Abbildung 7: Einfluss des Diskontsatzes auf den Endenergieverbrauch der Haushalte nach Energieträgern im Referenzszenario (REF) und im WTPK-Szenario mit einem niedrigeren Diskontsatz sowie dem WTP0A-Szenario mit Integration einer durchschnittlichen Willingness-to-Pay



Einfluss der Willingness-to-pay Unterschiede zwischen Stadt und Land (WTP1) auf die Treibhausgasemissionen der Haushalte

Der Einfluss der WTP-Ergebnisse (und die resultierenden Investitionskosten) auf bestimmte sozio-ökonomische Parameter wird in den folgenden Abbildungen näher erläutert. Die CO₂-Emissionen für städtische und ländliche Haushalte werden in Abbildung 8 verglichen, basierend auf der Berücksichtigung unterschiedlicher WTP-Faktoren für die Haushalte in städtischen bzw. in ländlichen Gebieten. Die Emissionsprofile sind in beiden Szenarien relativ vergleichbar. Dies deutet darauf hin, dass die breiteren sozioökonomischen Parameter, die im DCE für die städtische und ländliche Bevölkerung abgeleitet wurden, mit den methodischen Änderungen vergleichbar sind, die in TAM-HHs bereits enthalten sind, um die Heterogenität der Bevölkerung in Bezug auf Investitionen und Verbrauch darzustellen.

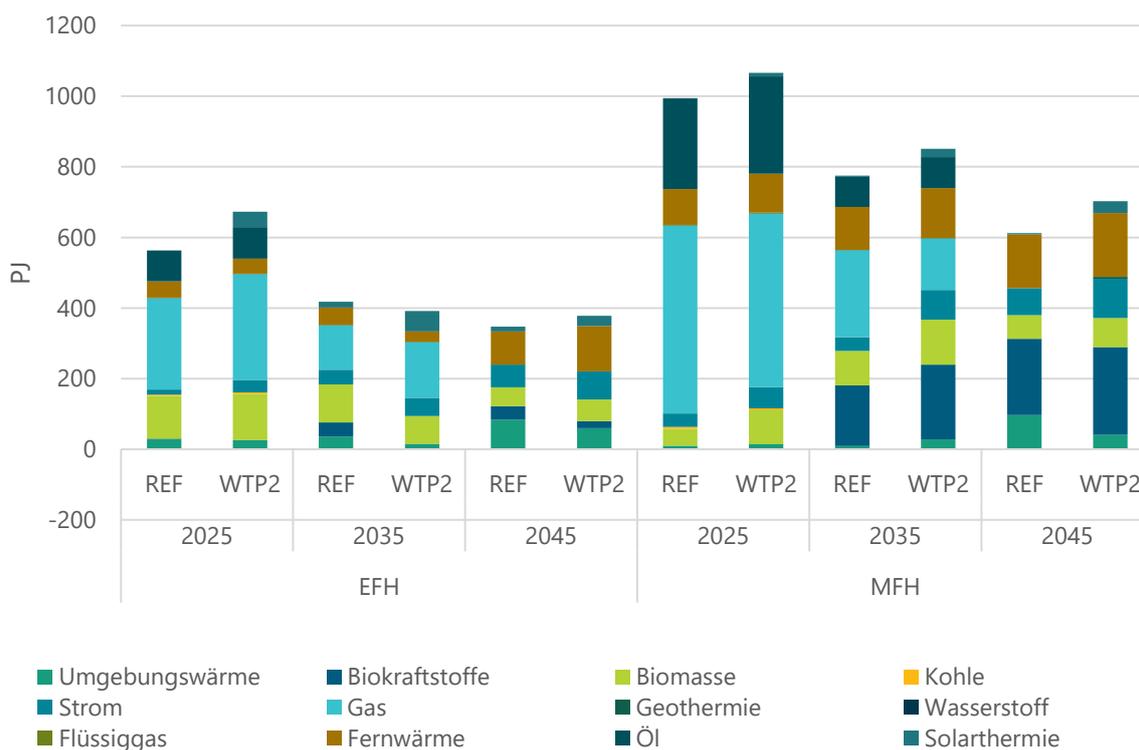
Abbildung 8: CO₂-Emissionen der Haushalte im Referenzszenario im Vergleich mit dem Szenario unter Berücksichtigung der sozioökonomischen Parameter der Zahlungsbereitschaft für städtische und ländliche Haushalte (WTP1)



Einfluss der Willingness-to-pay Unterschiede zwischen Mietern und Vermietern bei Ein- und Mehrfamilienhäusern (WTP2) auf den Endenergieverbrauch für Raumwärme und Warmwasser der Haushalte

Die Unterschiede in der Zahlungsbereitschaft zwischen Vermietern und Mietern bei Einfamilien- (EFH) und Mehrfamilienhäusern (MFH) sind in Abbildung 9 dargestellt. Die hier festgestellten Unterschiede lassen sich insbesondere auf die unterschiedlichen Zugangsmöglichkeiten und Entscheidungsbefugnisse zurückführen. Die Mehrheit der Haushalte in MFH sind Mieter und können daher keine Investitionsentscheidungen treffen, was zu einer größeren Verzögerung bei der Dekarbonisierung führt. Gleichzeitig befindet sich die Mehrheit der MFH in städtischen Gebieten, was sich in der stärkeren Nutzung von Fernwärme aufgrund des Zugangs zur Infrastruktur widerspiegelt. EFH hingegen verfügen über ein größeres Potenzial an PV-Dächern und nutzen daher häufiger Solarthermie und die PV-Stromerzeugung. Das WTP2-Szenario weist gegenüber dem Referenzszenario stärkere Abweichungen auf, was darauf hindeutet, dass zu den in den DCE-Ergebnissen erfassten Zahlungsbereitschaften noch weitere sozioökonomische Parameter innerhalb eines Gebäudetyps hinzukommen, um die Heterogenität im Haushaltssektor adäquat erfassen zu können.

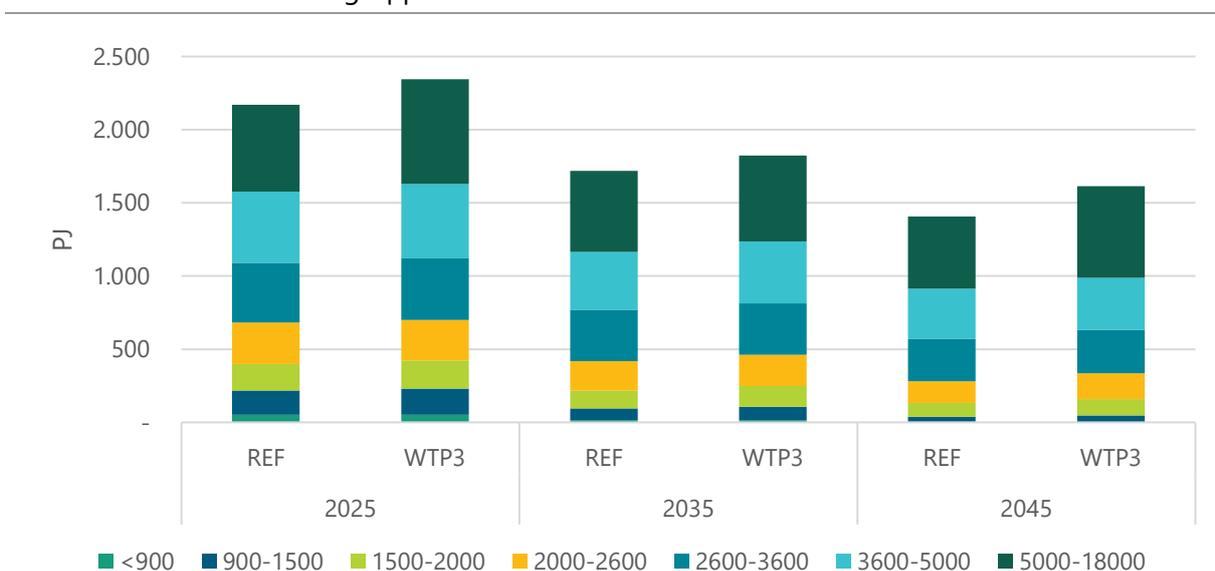
Abbildung 9: Einfluss der Zahlungsbereitschaft in EFH und MFH auf den Endenergieverbrauch der Haushalte für Raumwärme und Warmwasser nach Brennstoffart



Einfluss der Willingness-to-pay Unterschiede zwischen Einkommensgruppen (WTP3) auf den gesamten Endenergieverbrauch der Haushalte

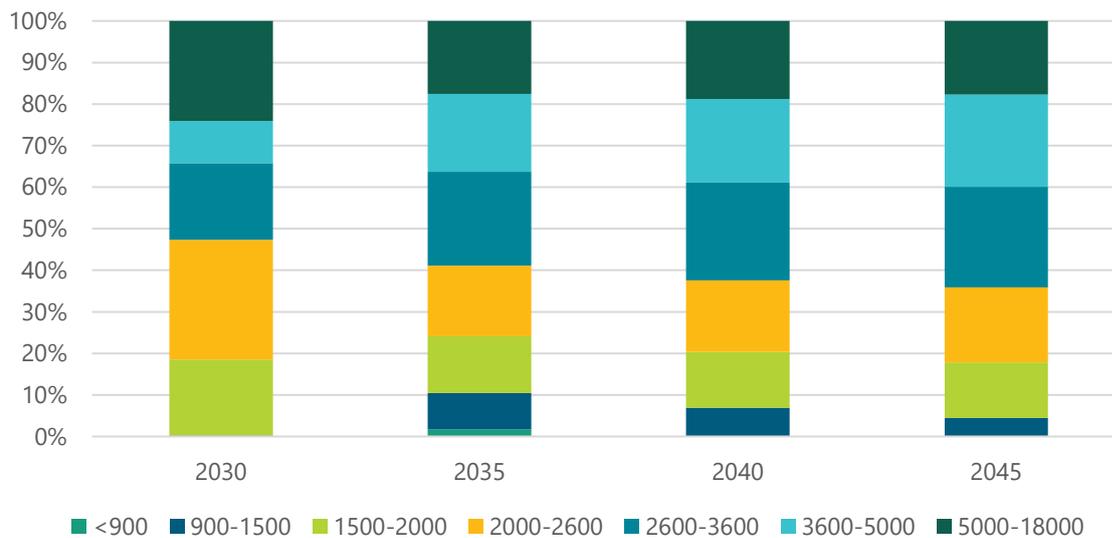
Abbildung 10 zeigt den Einfluss der Berücksichtigung der Zahlungsbereitschaft, differenziert nach Einkommensgruppen, im Vergleich zum Referenzszenario, bei dem eine Budgetbeschränkung angewendet wird. Ohne die Berücksichtigung der Budgetrestriktionen, insbesondere bei den Haushalten mit niedrigem Einkommen, können die Erwartungen an Investitionen überschätzt werden, wie dies die Ergebnisse aus dem Szenario WTP3 im Vergleich zum Referenzszenario zeigen. Da Heizungstechnologien hohe Vorlaufkosten haben, sollten Einschränkungen beim verfügbaren Kapital berücksichtigt werden.

Abbildung 10: Gesamter Endenergieverbrauch der Haushalte und Zahlungsbereitschaft nach Einkommensgruppen



Insbesondere die Möglichkeit, sich eine Gebäudesanierung leisten zu können, hängt weitgehend vom Einkommen ab, wie Abbildung 11 zeigt. Haushalte mit höherem Einkommen sind eher in der Lage, mittelfristig zu investieren, da sie auch eher Wohneigentümer sind. Haushalte mit niedrigerem Einkommen investieren nach 2035, sobald sie ein ausreichendes Budget angespart haben, um sich die Investitionen leisten zu können.

Abbildung 11: Anteile Investitionen in Sanierung nach Einkommensgruppen



5 **Fazit**

Im vorliegenden Meilenstein-Dokument 6 wurde TAM-HHs angewendet, um mehrere Variationen der Eingabedaten von SLICK mit zu integrieren. Die Analysen waren nützlich, um die Auswirkungen unterschiedlicher Technologiepreise für Verbraucher zu bestimmen, die sich aus den unterschiedlichen Investitionsschwerpunkten der Budgets ergeben. Zudem wurde der Einfluss der Berücksichtigung von Zahlungsbereitschaften auf die Technologiediffusion aufgezeigt. Die unterschiedlichen Eingangsdaten für die verschiedenen sozioökonomischen Parameter zur Beschreibung der Zahlungsbereitschaft wurden in mehrere Modellläufe integriert und mit einer alternativen Methodik zur Simulation der Erschwinglichkeit verglichen, nämlich Budgetbeschränkungen und einer Variation eines Abzinsungssatzes. Diese alternativen Methoden sind bereits in TAM-HH integriert, um die Heterogenität des Haushaltssektors im Modell weiter anzureichern.

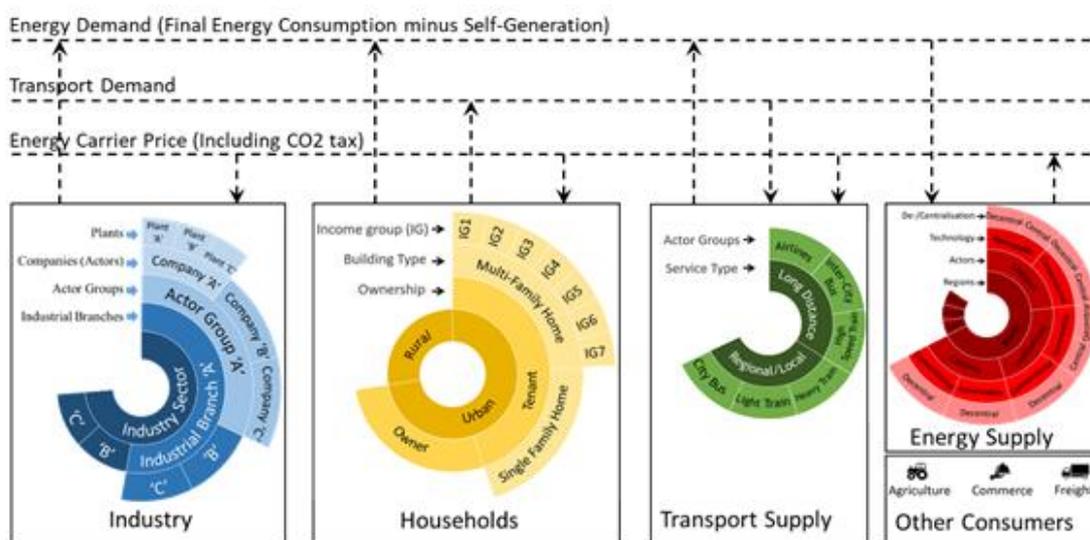
Für einen weiteren Vergleich der Modellierungsergebnisse wurden die drei Varianten der Innovationsmodell SLICK mit den Erkenntnissen aus den DCE-Experimenten zur Zahlungsbereitschaft kombiniert. Hier erfolgt die weitere Modellierung mit einer gemittelten Zahlungsbereitschaft und kombiniert mit Erkenntnissen aus den Ergebnissen des Innovationsdiffusionsmodells von SLICK. Diese Kombination der unterschiedlichen Einflüsse von Innovations- und Diffusionsaspekten wird im Meilenstein-Dokument 7 beschrieben.

A.1 Modellbeschreibungen

A.1.1 Modellbeschreibung TAM-HHs

Das TIMES-Akteurs-Modell (TAM) basiert auf dem TIMES-Modellgenerator, beinhaltet aber die detailliertere Charakterisierung der verschiedenen Akteure innerhalb der Angebots- und Nachfragesektoren. TAM verwendet das gleiche Grundkonzept wie TIMES und zielt auf die Ermittlung der wirtschaftlich optimalen Struktur des Energiesystems bei einem vorgegebenen Nutzenergie- bzw. Energiedienstleistungsbedarf und ggf. energie- und umweltpolitischen Vorgaben. Die Komplexität des Modells wird jedoch durch die erhöhte Auflösung der verschiedenen Wirtschaftssektoren des Energiesystems erhöht: Energieversorgung, Industrie, Haushalte und Verkehr, während die restlichen Sektoren weiterhin aggregiert abgebildet sind, wie in Abbildung 12 dargestellt (Ahanchian et al. 2020).

Abbildung 12: Darstellung der abgebildeten Akteursgruppen in TAM (Quelle: Universität Stuttgart - IER)



Um die höhere Sektorauflösung zu ermöglichen, ohne die Rechenzeit des Modells unnötig zu erhöhen, werden die Sektoren in Einzelmodelle aufgeteilt und durch einen Kopplungsmechanismus verbunden, der durch Nachfragen aus den Nachfragesektoren und Preise für Energieträger aus dem Angebotssektor durch einen iterativen Prozess ermöglicht wird. Der TAM-Modellhorizont erstreckt sich von 2013 bis 2060 in jährlicher Auflösung mit 4 Regionen im Angebotssektor sowie jeweils eine Region auf Jahresbasis in den Nachfragesektoren. Die Eingaben in das Modell zielen darauf ab, die Versorgung der Nachfragesektoren mit Energiedienstleistungen zu minimalen globalen Kosten sicherzustellen, indem gleichzeitig Entscheidungen über Anlageninvestitionen und -betrieb, Primärenergieversorgung und Energiehandel für jede Region getroffen werden. Wenn beispielsweise die Energiedienstleistung für die Beleuchtung von Wohngebäuden im Vergleich zum Referenzszenario zunimmt (vielleicht aufgrund eines Rückgangs der Kosten für die Beleuchtung von Wohngebäuden oder aufgrund einer anderen Annahme für das Einkommenswachstum), müssen entweder die vorhandenen Erzeugungsanlagen intensiver genutzt oder neue, möglicherweise effizientere Anlagen

installiert werden. Die Auswahl der Erzeugungsanlagen (Typ und Brennstoff) durch das Modell basiert auf der modellintegrierten vergleichenden Analyse der Eigenschaften alternativer Erzeugungstechnologien, auf der Wirtschaftlichkeit der Energieversorgung und auf Umweltkriterien.

TAM berücksichtigt auch Budgetrestriktionen, die die Investitionen auf das tatsächlich verfügbare Kapital für die definierten Akteursgruppen begrenzt. Diese methodischen Erweiterungen verbessern die Einschätzung der möglichen angebots- und nachfrageseitigen notwendigen Veränderungen.

Integration sozialwissenschaftlicher Ergebnisse in TAM-HH

Im Folgenden wird dargelegt, auf welche Weise unterschiedliche sozialwissenschaftliche Aspekte in TAM-HH integriert werden können:

1. Technologieadaption / Investitionsverhalten:

Input:

- Marktanteile aus DCE
- Charakterisierung der Entwicklung von Technologien
- Zugang zu Energieträgern und -netzwerken

Umsetzung:

- Profilspezifische User Constraints, Budget Constraints, Discount Rates
- Obere und untere Grenzen für Marktanteile
- Annahmen für andere Technologien (Technologie x+)

2. Lokale Akzeptanz von Technologien

Input:

- Willingness to Accept
- Nutzerspezifisches Investitionsverhalten

Umsetzung:

- Profilspezifische User Constraints, Budget Constraints, Discount Rates
- Technologiespezifische User Constraints
- „Zögern“ durch monetäre Limitierung (Hurdle Rates, Discount Rates)

3. Verhaltensaspekte bzgl. Technologienutzung

Input:

- Verbrauch, Suffizienz etc.
- Politikmaßnahmen (Energieeffizienz, Anforderungen, Technologieentwicklung)

Umsetzung:

- Profilspezifische Nachfrage
- Berücksichtigung von Rebound-Effekten, Suffizienz
- Constraints und Technologiekurven

4. Technologiegenese

Input:

- Verfügbarkeit von Technologien
- Constraints, um bestimmte Technologien nutzen zu müssen

5. Sozio-politische Rahmenbedingungen

Input:

- Politikmaßnahmen
- Rahmenbedingungen

Umsetzung:

- Constraints zur Zielerreichung
- Subventionen, Steuern, etc.

A.1.2 Modellbeschreibung SLICK

Das Modell SLICK (“Simulating Learning Curves via Knowledge modelling”) basiert auf dem SKIN-Modell (“Simulating Knowledge dynamics in Innovation Networks”) von Gilbert et al. (2001). SKIN wurde bereits vielfach im Kontext der Innovationsforschung in Unternehmensnetzwerken angewandt und stellt ein anerkanntes Verfahren in diesem Bereich dar. Im Rahmen eines anderen Projektes wurde mit SKIN-Energy das SKIN-Basis-Modell um einige Funktionalitäten erweitert, um es konkreter auf Technologieinnovationsprozesse anzupassen (vgl. Droste-Franke et al. 2020). Die Arbeiten an SKIN sind in das neu entwickelte Modell SLICK eingeflossen.

Da das zur Verwendung vorgesehene SKIN-Modell den Anforderungen des Projekts nicht genügte, wurde das Modell SLICK gänzlich neu entwickelt. Wissen wird im SLICK-Modell anders abgebildet, was die Integrierung von Lernkurven in die Modellierung ermöglichte. Viele Prozesse und Mechanismen konnten aber in ähnlicher Form aus SKIN übernommen werden.

Wissensgenese und Wissensaustausch sind, wie auch in SKIN, zentrale Elemente von SLICK. In dem agentenbasierten Modell interagieren Agenten mit heterogenen Eigenschaften in einer sich kontinuierlich verändernden Umgebung. Agenten im Modell sind vor allem Firmen und Forschungsinstitutionen, zum Beispiel im Bereich der Entwicklung von Wärmepumpen. Firmen produzieren und verkaufen innovative Güter wie Wärmepumpen oder deren Vorprodukte. Dazu benötigen sie Wissen und Inputs von anderen Agenten. Dies umfasst Wissen aus Forschung und Entwicklung (F&E), aber auch praktisches Wissen für eine effiziente Produktion und über benötigte Vorprodukte bzw. Ressourcen. Durch Forschung und Produktionskooperationen können Firmen entsprechendes Wissen generieren. So können Wärmepumpen durch den Einsatz neuer Materialien oder eines neuen Designs effizienter gestaltet werden. Forschungsinstitutionen forschen dabei in geförderten Projekten, vermehren so ihr Wissen und tauschen es unter anderem mit Firmen als Projektpartner aus. Findet eine Wärmepumpe keinen Absatz, senkt die Firma den Preis.

Das Modell SLICK enthält zusätzlich zum Basismodell folgende wesentlichen Aspekte, die für typische Fragen im Energiebereich wichtig sind: Zur Darstellung des Wissens wird eine Mengendarstellung verwendet, die Berechnung der Expertise von Agenten und Qualität von Produkten ist wesentlich verfeinert, Prozesse öffentlicher Förderung von Forschungsprojekten sind abgebildet, Start-up-Prozesse werden differenziert implementiert, große Firmen und Konglomerate sind abbildbar, der Produktraum ist stärker in Richtung Wertschöpfungskette strukturiert, begrenzte Nachfrage, Produktmengen und Wettbewerb werden modelliert und Märkte werden spezifisch abgebildet.

Um die Auswirkungen von Maßnahmen auf Struktur und Dynamik von Innovationsnetzwerken zu analysieren, werden diese im Rahmen von Simulationsexperimenten in SLICK implementiert. Maßnahmen können dabei direkt darauf abzielen, bestimmte Funktionalitäten eines Innovationssystems zu verbessern. Eine Maßnahme könnte es zum Beispiel sein, die Zusammenarbeit und Kommunikation entlang der Wertschöpfungskette (zum Beispiel zwischen Wärmepumpenherstellern und den Zulieferern) bzw. quer dazu (zum Beispiel unter bestimmten Zulieferern) und damit den Wissensaustausch zwischen den jeweiligen Akteuren zu verstärken.

Wissen und Zustand der Agenten in SLICK

In SKIN wird das Wissen der Agenten abgebildet in Form der sogenannten *Kenes* (*Knowledge Genes*), also einer Sammlung von Vektoren mit den drei Dimensionen *Capability* (in etwa „Fachrichtung“ oder „Disziplin“), *Ability* (entspricht einer bestimmten Methode innerhalb einer Disziplin) und *Expertise* (Erfahrung mit der Methode). Im Gegensatz dazu wird in SLICK zwischen zwei Arten des Wissens unterschieden (Abbildung 13): Wissenschaftliche Kenntnisse (*Scientific Knowledge* SK, kann in etwa mit der *Capability* aus SKIN verglichen werden) und Produktionswissen (*Production Knowledge* PK, grob mit der *Expertise* aus SKIN vergleichbar). Dementsprechend gibt es auch zwei Arten von F&E-Aktivität, die entweder SK verändert oder PK vergrößert. Während PK kumulativ wächst und dadurch der Agent die Lernkurve „hinunterrutscht“, legt SK fest, welcher Produkttyp hergestellt wird und wie die Parameter der Lernkurve aussehen. Neben PK, das einen der drei Faktoren der Lernkurve bedient, gehen noch zwei weitere Parameter in die Lernkurve ein: das bis dato verkaufte Produktionsvolumen (*Cumulative Production Volume* CV) und die Produktionsskala (*Production Scale* SC). Darüber werden Lerneffekte durch *learning-by-doing* sowie *economies of scale* abgebildet, die außerhalb des expliziten bzw. explizierbaren Wissensbegriffs stattfinden.

Im Folgenden wird die Abbildung von Lernkurven und Installateuren im Modell erläutert.

Lernkurven

Generell orientiert sich der implementierte Lernkurvenmechanismus an den in Watanabe et al. (2000) und IEA (2000, S. 29ff.) beschriebenen Prozessen. Es wurde eine Drei-Faktor-Lernkurve entwickelt, welche die „Drei Quellen des Lernens“ aus Day & Montgomery (1983) widerspiegelt, nämlich: (1) die Wissensgewinnung durch produktbezogene Forschung und Entwicklung (R&D), (2) Erfahrung erlangt durch *learning-by-doing* und (3) Skaleneffekte (Abbildung 13). Gleichzeitig ist die Lernkurve komponentenbasiert (siehe z. B. Rubin et al. 2015) und besteht aus einer von der Komplexität der Technologie abhängigen Anzahl Subkomponenten. Für jede der Subkomponenten liegt ein Element von SK und PK vor. Die Wissensgenerierung aus wissenschaftlicher Forschung und Entwicklung bestimmt SK und damit die Lernrate oder Steigung sowie die initialen Kosten.

Das wissenschaftliche Wissen SK wird in Form eines Baumes modelliert, der Wissenshierarchien bzw. Wissensvererbung sowie Ähnlichkeiten zwischen Technologien berücksichtigen kann (Abbildung 14 links). Ein „Stamm“ repräsentiert eine Technologiegruppe (z.B. Wärmepumpen) und die „Äste“ des Baums stellen verschiedene Varianten der Technologie dar (z.B. Luft/Wasser-Wärmepumpen, Wasser/Wasser-Wärmepumpen und Sole/Wasser-Wärmepumpen). Jedes konkrete marktfähige Produkt ist mit einem Wissenszustand verknüpft, den eine Firma einnehmen kann. Der aktuelle Wissenszustand bildet ein „Blatt“ des Baumes, wobei die vorigen Zustände einen „Zweig“ bilden. Durch Forschung und Weiterentwicklung ihres Produkts kann eine Firma inkrementell den „Ast“ erweitern, also „wachsen lassen“. Indem Firmen eine neue Idee verfolgen, die von dem vorhandenen Wissen ausgeht, kann im Baum eine neue Verzweigung entstehen.

Jede Komponente der Lernkurve steht für den Beitrag eines Produktionsprozesses zu den Gesamtkosten. Manche Kostenkomponenten haben einen geringen oder gar keinen Lerneffekt (geringe Steigung der Lernkurve), während bei anderen eine starke Kostenreduktion durch Lernen zu erwarten ist. Mit wachsender Erfahrung haben die stark lernenden Komponenten einen immer geringer

werdenden Anteil an den Gesamtkosten und die schwach lernenden Komponenten werden dominierend. Dadurch flacht die Lernkurve mit der Zeit ab (Abbildung 14 rechts), ein Effekt, der auch in gemessenen Lernkurven beobachtet wurde.

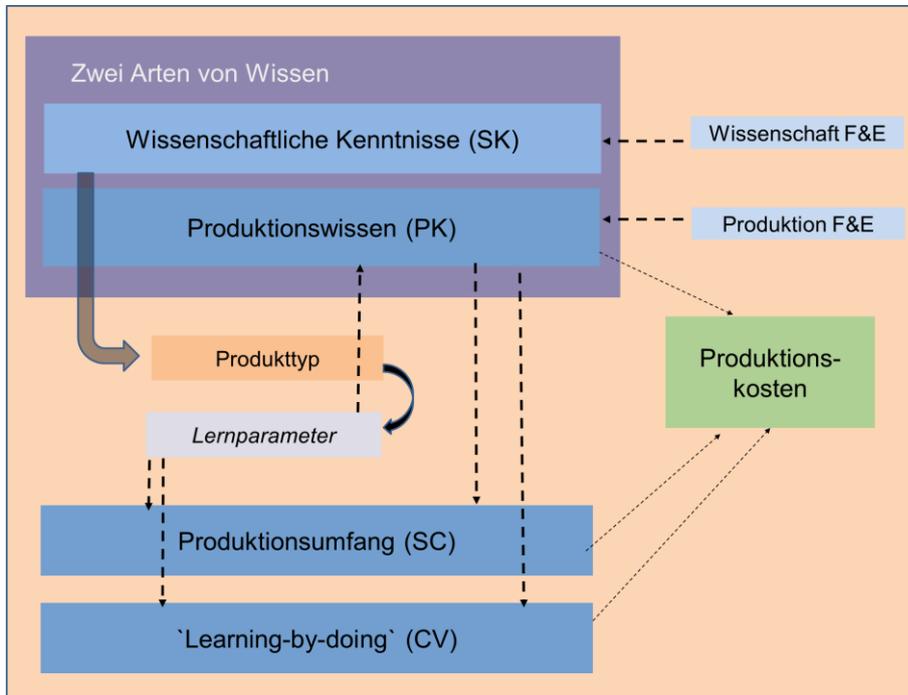


Abbildung 13: Schematische Darstellung des Lernkurven-Moduls

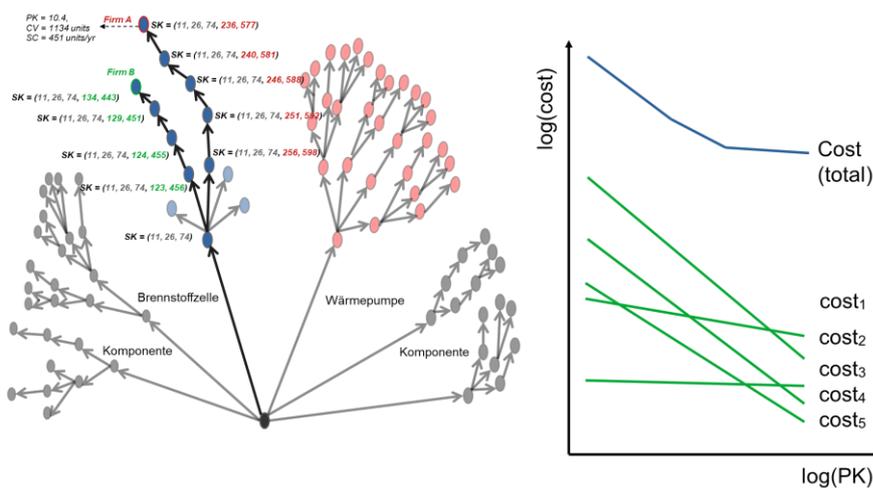


Abbildung 14: Beispiel Technologie- & Kostentwicklung

Installateure

Innerhalb des entwickelten Innovationsmodells wurde ein Modul integriert, das den Einfluss von Installateuren abbildet (Abbildung 15). Die Installateure bilden in der Wertschöpfungskette des

SLICK-Modells eine neue Schicht zwischen den Herstellern von Endprodukten (in diesem Fall Heizgeräten) und den Konsumenten des Markts (nicht als Agenten im Modell abgebildet). Die Installateure waren durch die empirischen Untersuchungen in Interviews und Workshops mit Expert*innen als eine wichtige Kategorie von Akteuren für die Diffusion von Heiztechnologien identifiziert worden.

Zwei Aspekte wurden dabei berücksichtigt: (1) das Verhalten der Installateure und (2) die Anzahl an Installateuren. Das Verhalten der Installateure wird über vier Aktivitäten abgebildet: (a) die Installation von Produkten, (b) das Erlernen neuer Produkte, z. B. Erweiterung des Installateurportfolios durch Weiterbildung, (c) der Austausch mit Herstellern und (d) der Austausch mit anderen Installateuren (z. B. in größeren Firmen). Die Anzahl an Installateuren wird bestimmt durch Aus- und Weiterbildung. Die Fähigkeiten der Installateure sind durch ihr Wissensportfolio festgelegt, das durch die Aus- und Weiterbildung bestimmt wird. Ebenso haben die Installateure unterschiedliche Einstellungen gegenüber innovativen Technologien und dem Erlernen neuer Kenntnisse, was sich in unterschiedlichen Teilnahmequoten von Weiterbildungen niederschlägt. Das in Deutschland übliche „duale System“, mit Ausbildung sowohl in der Berufsschule als auch in einem Meisterbetrieb mit Meister-Lehrling-Beziehung, wird ebenfalls modelliert. Dabei wird das Wissen der neu ausgebildeten Installateure wesentlich durch die vom Meister übertragenen Kenntnisse und Erfahrungen bestimmt. Die Modellierung umfasst mögliche Politikmaßnahmen wie das Nachfragemanagement und die verbesserten Lernbedingungen für Installateure.

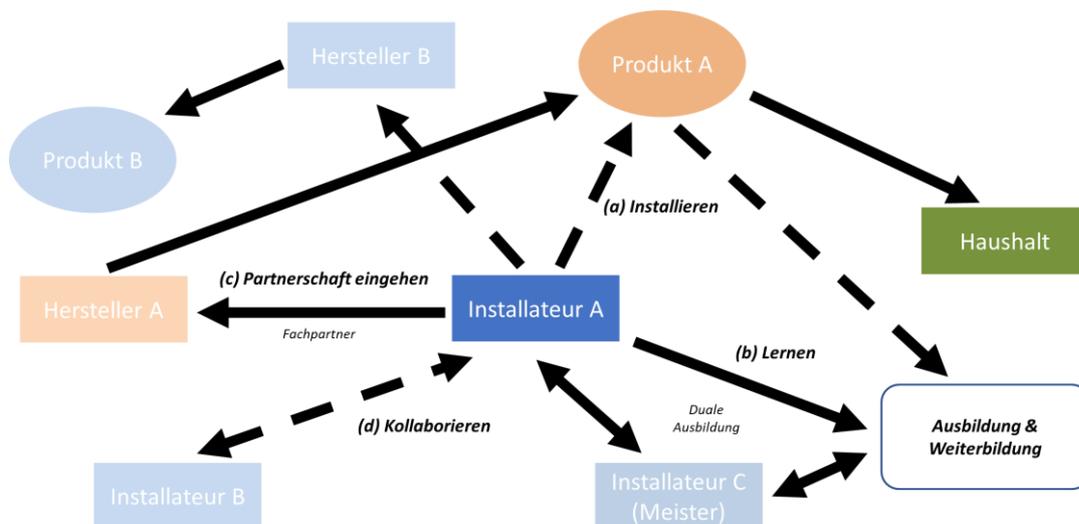


Abbildung 15: Schematische Darstellung des Installateur-Moduls

Die Darstellung der Szenarien erfolgt im Anhang A.2.

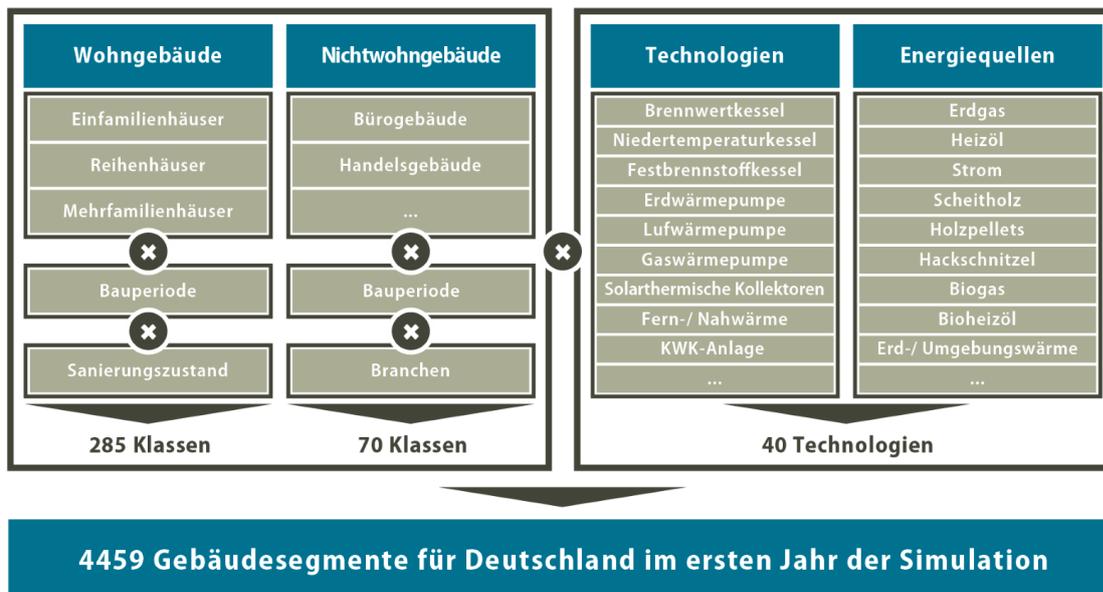


Abbildung 16: Struktur der hinterlegten Gebäudetypologie in Invert/EE-Lab

Modellierung von Investoren im Gebäudebereich

Im Modell können einzelne Investorentypen implementiert werden, welche den Referenzgebäudesegmenten anteilig als Besitzer zugeordnet werden. Diese Anteile sind zeitabhängig und können somit exogen über den Simulationszeitraum verändert werden. Das Modell erlaubt die Definition beliebig vieler Investorenagenten, welche jeweils Instanzen einer von fünf möglichen Agentenklassen darstellen – *Selbstnutzende Eigentümer*, *Private Vermieter*, *Eigentümergeinschaften*, *Wohnungsbaugesellschaften*, *gewerbliche Gebäudebesitzer*. Als Grundlage der Investitionsentscheidung werden verschiedene ökonomische und nichtökonomische Entscheidungskriterien definiert, die für jede Kombination von Investoren, Referenzgebäudesegmenten und Technologieoptionen individuell ermittelt werden. Die Eigenschaften einer Investoreninstanz werden als Eingangsdaten definiert, womit einerseits die Relevanz unterschiedlicher Entscheidungskriterien über Gewichte bestimmt werden, andererseits auch die Ausprägung der Kriterien beeinflusst werden. Somit wird sowohl die Art der Investitionsentscheidung – Berücksichtigung unterschiedlicher Kriterien – als auch die Wahrnehmung der Technologieoptionen und der damit verbundenen Parameterausprägungen unterschieden. Für jede zur Verfügung stehende Technologieoption werden in jedem Referenzgebäudesegment aus Sicht jeder Investoreninstanz Nutzwerte berechnet, auf deren Basis die Marktanteile mit einem *Nested-Logit-Modell* ermittelt werden.

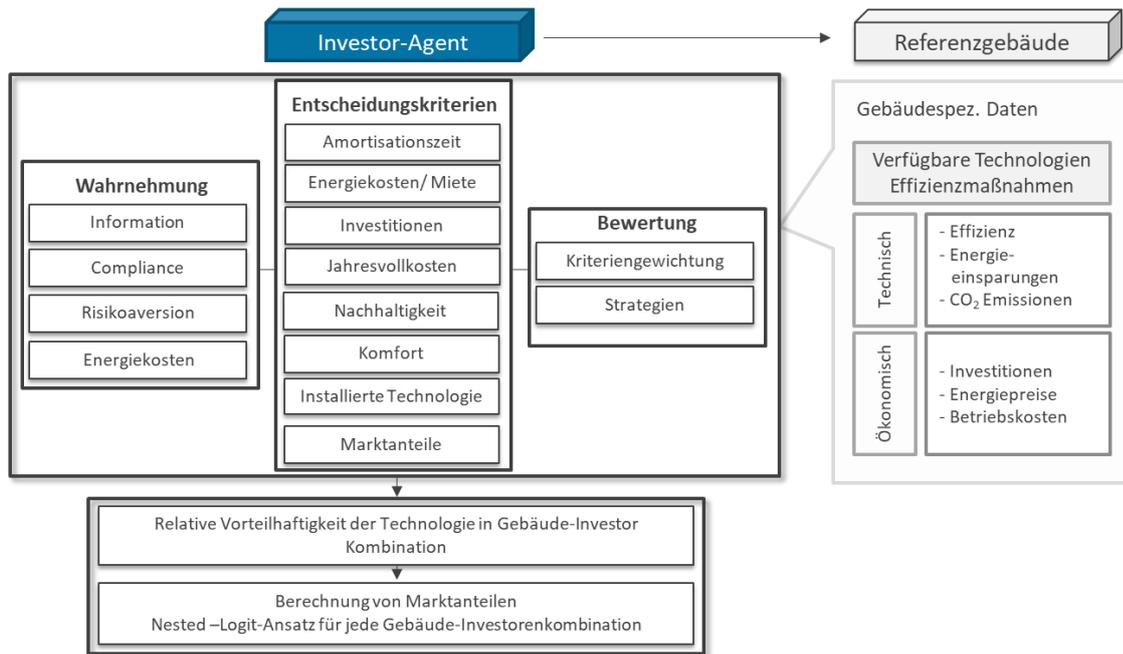


Abbildung 17: Modellierung der Gebäudeeigentümer als Investor-Agenten

A.2 Modelltechnischer Ansatz SLICK – Kalibrierung und Szenarien

Modellierungsansatz – Lernkurven und Produktinstallation

SLICK (Simulating Learning Curves via Knowledge modelling) ist ein Modell, das die Analyse des Akteursverhaltens in Innovationsnetzwerken (Arbeitspaket „Modellierung von Akteursverhalten in Innovationsnetzwerken“) ermöglicht. Generell betrachtet zielt SLICK innerhalb MANIFOLD darauf ab, Einblicke und Erkenntnisse zu gewinnen, durch welche politischen Maßnahmen die Produktion und Installation bestimmter Technologien optimiert werden können.

Im Vordergrund stehen dabei insbesondere die Effekte unterschiedlicher Wissenstransfermechanismen zwischen unterschiedlichen Akteuren sowie die kontextspezifische Konfiguration solcher Mechanismen auf die Entwicklung technologischer Innovationssysteme. Mit einem besonderen Fokus auf der Bereitstellung von Gebäudeheiztechnologien sind zwei Kernaspekte in dem Modell abgebildet: die Kostenverbesserung durch Lernkurven in der Technologieproduktion und die Expertise und das Portfolio der jeweiligen Installateure.

Definition von Schlüsselvariablen und Kalibrationsumgebung

Eine Definition von Schlüsselvariablen und der Kalibrationsumgebung ist in Tabelle 4 dargestellt.

Die Nachfragedaten bezüglich der modellierten Technologien werden mit dem Modell INVERT generiert und basieren hauptsächlich auf den sozio-ökonomischen Rahmendaten des Jahres 2021. Diese werden als Eingang für SLICK verwendet.

Tabelle 4: Schlüsselvariablen SLICK

Schlüsselvariable	Variable	Beschreibung	Unterkategorie
Hersteller	Lieferketten	Das erforderliche Wissen zur Herstellung einer spezifischen Produktart	
		Die durchschnittlichen Kosten zur Produktion einer spezifischen Produktart	
		Die durchschnittliche zu einer spezifischen Produktart gehörende Lernkurve, wobei der Preis und die Preisbildung von Produkten durch zwei Kostenpunkte bestimmt werden:	Input-Kosten: Kosten der für die Produktion benötigten Elemente
			Produktionskosten: Kosten der Produktion
		Das durchschnittliche zu einer spezifischen Produktart gehörende Wissen	
		Die durchschnittliche kumulierte Produktionsmenge, die von einer spezifischen Herstellergruppe einer spezifischen Produktart hergestellt wird	
	Die durchschnittliche Produktionsmarge einer spezifischen Produktart		
Hersteller-Landschaft		Anzahl an Akteuren, die Produkte herstellen	Anzahl einzelner Firmen

			Anzahl Großkonzerne Anzahl Tochterfirmen von Großkonzernen Anzahl Start-ups
	Kapital	verfügbares Kapital für die Herstellung	
	Produktnachfrage	Anzahl an auf dem Markt nachgefragten Geräten (durch Endkunden). Generell basiert diese auf:	gesamter Wärmebedarf gesamte Installationskapazität (pro Technologie) Gesamte Gerätekapazität: Diese Nachfrage wird beeinflusst von der Größe unterschiedlicher Produktarten.
Installateure	Installierte Geräte	Die Anzahl an installierten Geräten pro Jahr (für alle spezifischen Endprodukte)	
	Installateurs-Ausbildung	Eintritt neuer Installateure in das System	
	Fortbildung	Erweiterung der Installateur-Portfolios und installierte Gesamtkapazität basierend auf spezifischen erlernten Produkten	
Öffentliche Ausgaben	R&D	Das Volumen öffentlicher Ausgaben durch R&D-Programme. Zwei wichtige Entscheidungen sind	Gesamtinvestitionen Aufteilung der Investitionen auf Produkte
	Förderungen (Subventionen)	Finanzielle Ressourcen bereitgestellt an Hersteller bestimmter Produktarten	
	Installateurs-Ausbildung	Finanzielle Ressourcen, die in die Weiterbildung von Installateuren investiert werden	

Kalibration & Szenarientwicklung

Lernkurven und Produktionskosten

In SLICK kann eine Vielzahl an Variablen sowohl vor als auch während Simulationsläufen gesetzt und geändert werden. Für die Szenarientwicklung und -definition werden nur ausgewählte Variablen variiert, auch um das Level an Komplexität zu reduzieren und das generelle Verständnis zu schärfen.

In SLICK sind die unterschiedlichen Kapazitäten der Heiztechnologien nur relevant, um die Lernkurven zu bestimmen, z. B. Kosten pro Kapazität (€/kW).

Alle modellierten Produkte (hergestellt und installiert) – sowie die modellierten Lernkurven – werden auf 1 kW normiert. Dies ist eine abstrakte, von der Realität entkoppelte Annahme, die für die Dynamik des Modells irrelevant ist:

- Die Modellierung unterschiedlicher Produktgröße würde lediglich die Margen der Hersteller beeinflussen (entweder positiv oder negativ).
- Es beeinflusst nicht den relativen Erfolg der gesamten Produktgruppe unter der Annahme, dass es keine signifikanten Differenzen in der Verteilung der Produktkapazitäten zwischen den einzelnen Technologiegruppen gibt.
- Weiter wird die Annahme getroffen, dass die notwendige Installationszeit unabhängig von der Produktgröße ist und somit keinen Einfluss auf das Installationsaufkommen der Handwerker hat.

Zur Berechnung realistischer Endkundenpreise sind folgende Faktoren relevant:

- Unterscheidung zwischen der Gesamtsumme verkaufter Einheiten innerhalb einer spezifischen Technologiegruppe hinsichtlich der relativen Verteilung unterschiedlicher Produktkapazitäten
- Produkt der (1) Produktionskosten (mit zeitlicher Änderung) und Produktkapazitäten (z. B. x3, x5, x10 für Produkte mit 3 kW, 5 kW, 10 kW)
- Zur Ableitung des Preises aus den Kosten müssen die Produktionskosten mit der Profitmarge multipliziert werden (10 % in SLICK).
- Um die Gesamteinkünfte aller verkauften Einheiten einer speziellen Produktkategorie zu bestimmen, werden die Preise mit der Gesamtzahl der installierten Einheiten multipliziert.

Kalibration der Lernkurven

Das Innovationsmodell SLICK enthält dreifaktorige Lernkurven für die Preisentwicklung der hergestellten Produkte. Diese Lernkurven müssen mit Annahmen über den Bereich der Lernkurvenparameter kalibriert werden. Dazu wurden untere und obere Grenzen für die Lernraten festgesetzt. Die Lernrate entspricht der prozentualen Abnahme der Kosten bei einer Verdoppelung der Erfahrung (also bei Verdoppelung des Produktionswissens, bei Verdoppelung der verkauften Produktionsmenge oder bei Verdoppelung der Produktionsskala). Zur Reduktion der Dimensionalität des Lösungsraums, und in Ermangelung genauerer Daten, wurden zwecks Kalibration von SLICK in Manifold für jeden der drei Lernkurven-Faktoren (also *learning-by-doing*, *learning-by-researching* und *economy of scale*) derselbe Lernratenbereich angenommen. Das Modell bietet aber die Möglichkeit, hier unterschiedliche Akzente zu setzen, wenn dies angebracht erscheint. Je nach Technologie können die Effekte von *learning-by-doing*, *learning-by-researching* und *economy of scale* unterschiedlich stark auf die Kostensenkung einwirken.

Es ist schwierig, der wissenschaftlichen Literatur konsistente Werte für Lernraten zu entnehmen. Oft gibt es große Abweichungen, teils schon innerhalb einer Studie. Nicht selten sind Lernkurven stark abhängig von räumlichem und zeitlichem Rahmen und verlaufen selbst in benachbarten Staaten gänzlich unterschiedlich. Darüber hinaus gibt es auch bei der verwendeten Methodik (etwa Preis- oder Kostenbasiert) und Datenherkunft große Quellen für Varianzen.

In Tabelle 5 ist eine Übersicht der in einer Literaturrecherche gefundenen und für SLICK in Manifold übernommenen Bereiche für die Lernraten angegeben. Die der Literatur entnommenen Wertebereiche wurden häufig auf 5%-Schritte gerundet. Es handelt sich hierbei nur um die Extrema der Lernraten, also die Leitplanken des Modells. Die tatsächlichen Lernparameter stellen sich in SLICK über einen stochastischen Prozess durch Variation des wissenschaftlichen Wissens sowie Genese und Diffusion von Wissen ein, wobei es sich wie in agentenbasierter Modellierung üblich um einen Emergenzprozess handelt. Zusätzlich zu den Lernraten, welche die Steigung der Lernkurve festlegen, müssen ebenfalls die Bereiche der Achsenabschnitte über die initialen Kosten der Produktionsprozesse (d.h. Komponenten der Lernkurven) gesetzt werden. Dies wurde derart durchgeführt, dass sich in etwa Preise der Heiztechnologien ergeben, die recherchierten Preisen entsprechen.

Tabelle 5: Parameter zur Kalibration der Lernkurven

Technologie	Berichtete Lernrate	Quellen	Räumlicher Rahmen d. Quellen	Zeitlicher Rahmen d. Quellen	Gewählter Bereich fürs Modell
Wärmepumpen (allgemein)	3%	Kiss et al. (2012)	Schweden	1985 – 1995	5% bis 25%
	10%	McDonald & Schratzenholzer (2001)	Japan	1972 – 1997	
	10%	Kiss et al. (2012)	Schweiz	2005 – 2008	
	17%	McDonald & Schratzenholzer (2002)	Japan	1990 – 1997	
	18%	Desroches et al. (2012)	USA	1980 - 2010	
	21%	Kiss et al. (2012)	Schweiz	1982 – 2008	
Brennstoffzellen SOFC	-2% - 12%	Wei et al. (2015)	Japan / USA	2009 – 2014	15% bis 40%
	15% - 20%	Staffell & Green (2013)	Asien / Pazifik	2010 – 2030	
	17% - 39%	Rivera-Tinoco et al. (2012)	-	-	
Brennstoffzellen PEMFC	-2% - 12%	Wei et al. (2015)	Japan / USA	2009 – 2014	15% bis 35%
	15% - 20%	Staffell & Green (2009)	Japan / Europa / Global	2005 – 2035	
	15% - 20%	Staffell & Green (2013)	Asien / Pazifik	2010 – 2030	
	18% - 30%	Schoots et al. (2010)	-	1970 – 2006	
	10% - 40%	Schwoon (2008)	Verschiedene	-	
Pelletkessel / Biomasseheizung	8% - 18%	Renaldi et al. (2020)	Deutschland	1984 – 2016	5% bis 20%
Gaskessel	5% - 13%	Renaldi et al. (2020)	Niederlande / UK	1981 - 2017	5% bis 15%

Definition der Szenarien

Der Kernfokus in der Szenarienentwicklung liegt auf dem Effekt unterschiedlicher möglicher Optionen für Politikmaßnahmen und damit verbundener Rahmenbedingungen. Diese haben zwei Dimensionen:

- **Fördersysteme:** Die Steuerung des Verhaltens und die Verbesserung der Fähigkeiten von Intermediären, Wertschöpfungsketten-Akteuren, z. B. Akteure, die in Relation zu Nachfrage und Angebot von Technologien agieren.
- **Regulation:** Dies beinhaltet administrative und regulative Gesetze.

Unter diesen Randbedingungen umfassen SLICK-relevante Akteure:

- **Produzenten:** Das Verhalten und die Fähigkeiten von Produzenten werden beeinflusst mittels (1) Marktförderung, und (2) R&D-Programmen
- **Installateure:** Das Verhalten und die Fähigkeiten von Installateuren werden beeinflusst durch (1) Grundausbildung, und (2) Weiterbildung

Insgesamt werden drei vier Szenarien modelliert, ein Referenzszenario und drei Politiksznarien.

Referenzszenario

Das Referenzszenario basiert auf den aktuell gültigen Instrumenten und dem existierenden Status Quo.

Szenario 1 – Liberal & Technologieoffen

In Szenario 1 werden alle modellierten Technologien gleichbehandelt. Obwohl die mögliche Verwendung nicht explizit in SLICK modelliert wird, ist im Vergleich zum Referenzszenario folgender Unterschied:

- Nachfrage: Eine substantiell relativ große Nachfrage nach auf Gas basierenden Produkten
- Installateurs-Ausbildung: Die Art der Ausbildung ist eher konservativ, also eher fokussiert auf gasbasierten Heizungen.

Szenario 2 - Progressive

In Szenario 2 wird der Fokus auf der Förderung von Wärmepumpen sowie Wärmenetzen (nicht fokussierter Bestandteil von SLICK). Es gibt große Investitionen, die Aus- und Weiterbildung von Installateuren zu verbessern, speziell für Wärmepumpen.

Daraus folgt für die Umsetzung folgendes:

- Nachfrage: eine erhöhte Nachfrage nach Wärmepumpen und Brennstoffzellen
- Forschung: in Relation erhöhte öffentliche Förderung von R&D in Wärmepumpen und Brennstoffzellen
- Markt-Incentives: Investitionen für Hersteller von Wärmepumpen und Brennstoffzellen
- Handwerker Ausbildung: (1) Höhere Kapazitäten durch Erhöhung der maximalen Anzahl von Studenten, und (2) Fokus auf Wärmepumpentechnologien
- Lernen: (1) hohe Frequenz der bereitgestellten Lernprogramme, (2) mehr Plätze innerhalb der Lernprogramme verfügbar, (3) reduzierte Kosten innerhalb der Lernprogramme, und (4) Unterstützung nachhaltiger Produkte für die ersten 10 Jahre (Zehnjährige Förderung, Z. B. konsistent zur Zielerreichung für 2030)

Szenario 3 - Moderate

In Szenario 3 wird verglichen zum Referenzszenario folgendes angepasst:

- Nachfrage: Erhöhte Nachfrage nach Wärmepumpen (weniger als in Szenario 2)
- Market-Incentives: verbesserte Bedingungen für Wärmepumpen-Hersteller (weniger verglichen zu Szenario 2)
- Forschung: in Relation verbesserte Bedingungen für Wärmepumpen (weniger verglichen zu Szenario 2)
- Handwerker Ausbildung: ausgewogener Fokus auf alle Technologien, keine spezifische Technologiepriorisierung

Politik- und Investitionsstrategie

Alle in SLICK implementierten Szenarien beinhalten unterschiedliche Investitionsstrategien bezüglich (1) R&D-Projekten, (2) Subventionen, (3) Handwerker aus- und (4) Weiterbildung.

1 – *Öffentliche R&D-Projekte*: Da die relative Verteilung an verfügbarer Förderung für unterschiedliche Technologiegruppen beim Start jeder Simulation initial festgelegt ist, wird der erwartete Umgang an finanziellen Ressourcen für jede Technologiegruppe berechnet basierend auf der Gesamtsumme, die in R&D-Projekte investiert wird. Dies ist eine Schätzung, da individuelle Projekte auch die Möglichkeit haben, unterschiedliche Technologiegruppen zu adressieren. Aus SLICK wird nur die Gesamtsumme an Ausgaben für R&D-Projekte exportiert.

2 – *Subventionen*: In allen Szenarien werden nur Wärmepumpen (Luft und Erdwärme) und Brennstoffzellen (PEMFC und SOFC) als mögliche Empfängertechnologien für Förderung betrachtet. Die Dauer und Verteilung über die verschiedenen Technologiegruppen unterscheiden sich je nach Szenario. Subventionen sind Bestandteil von Szenario 2 und 3. Zudem erfolgt in Szenario 2 und 3 die Technologiestimulation durch eine Zusatzzahlung basierend auf dem Produktpreis. Dies erfolgt lediglich für die Wärmepumpentechnologie. Kalkulationen der Verteilung der zusätzlichen Stimulation für Wärmepumpen sind eine Approximation, da dies auf den tatsächlichen Preisen einzelner Hersteller basiert (ändern sich im zeitlichen Verlauf, derzeit nicht in SLICK exportiert). Diese Approximation basiert auf (a) Durchschnittspreis, und (b) Gesamtzahl verkaufter Einheiten (zum Zeitpunkt x).

3 – *Installateursausbildung*: Es gibt keine technologiespezifischen Investitionen (nur die Art der Ausbildung wird bestimmt, variierend von konservativ, normal, progressiv und liberal); die Kosten basieren auf der Anzahl an Studenten, die sich einschreiben.

4 - *Zusätzliche Weiterbildung der Installateure*: Spezifische Technologien können stimuliert werden durch ein exklusives Angebot an Schulungen für die folgenden Technologien:

- Betrachtung der Szenarien, dies wird nur in Szenario 2 für Wärmepumpentechnologien für die ersten 10 Jahre gemacht.
- Im SLICK-Output gibt es keine Unterscheidung zwischen Luft- und Erdwärmepumpen. Dies kann erfolgen über eine nachträgliche Simulation der Abschätzung durch Vergleich der Gesamtkapazitäten für die jeweiligen Technologien zum Zeitpunkt x über den spezifischen Zeitraum.

6 **Abbildungsverzeichnis**

Abbildung 1: Entwicklung technologiegenerischer Akteursmodelle zu Technologieentwicklung und -adoption.....	5
Abbildung 2: Modellschnittstellen und Modellintegration in MANIFOLD	6
Abbildung 3: Technologieunterschiede nach Szenario.....	14
Abbildung 4: Endenergieverbrauch der Haushalte nach Energieträgern und Technologiepreis-Szenario, 2025-2045	15
Abbildung 5: Endenergieverbrauch für Raumwärme und Warmwasser in Einfamilienhäusern mit Eigentümern der Einkommensgruppe >5000 Euro pro Haushalt und Monat.....	16
Abbildung 6: Übersicht zum Einfluss von WTP-Parametern auf die Treibhausgasemissionen der Haushalte nach sozioökonomischen Merkmalen und WTP-Szenarien im Jahr 2035	20
Abbildung 7: Einfluss des Diskontsatzes auf den Endenergieverbrauch der Haushalte nach Energieträgern im Referenzszenario (REF) und im WTPK-Szenario mit einem niedrigeren Diskontsatz sowie dem WTP0A-Szenario mit Integration einer durchschnittlichen Willingness-to-Pay	21
Abbildung 8: CO ₂ -Emissionen der Haushalte im Referenzszenario im Vergleich mit dem Szenario unter Berücksichtigung der sozioökonomischen Parameter der Zahlungsbereitschaft für städtische und ländliche Haushalte (WTP1)	22
Abbildung 9: Einfluss der Zahlungsbereitschaft in EFH und MFH auf den Endenergieverbrauch der Haushalte für Raumwärme und Warmwasser nach Brennstoffart.....	23
Abbildung 10: Gesamter Endenergieverbrauch der Haushalte und Zahlungsbereitschaft nach Einkommensgruppen.....	24
Abbildung 11: Anteile Investitionen in Sanierung nach Einkommensgruppen.....	25
Abbildung 12: Darstellung der abgebildeten Akteursgruppen in TAM (Quelle: Universität Stuttgart - IER)	27
Abbildung 13: Schematische Darstellung des Lernkurven-Moduls	31
Abbildung 14: Beispiel Technologie- & Kostentwicklung.....	31
Abbildung 15: Schematische Darstellung des Installateur-Moduls	32
Abbildung 16: Struktur der hinterlegten Gebäudetypologie in Invert/EE-Lab	33
Abbildung 17: Modellierung der Gebäudeeigentümer als Investor-Agenten.....	34

7 Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Integration unterschiedlicher Aspekte in die Energiesystemmodellierung.....	7
Tabelle 2: Szenarioübersicht SLICK mit TAM-HHs: Technologiepreise 2035 - Durchschnittlicher Unterschied zum Referenzpreis 2020 (2020=100)	14
Tabelle 3: Ergebnisse des Discrete-Choice-Experimentes der Pilotstudie für die gesamte Stichprobe als Willingness-to-pay	18
Tabelle 4: Schlüsselvariablen SLICK.....	35
Tabelle 5: Parameter zur Kalibration der Lernkurven.....	38

8 Literaturverzeichnis

- Day, G. S.; Montgomery, D. B. (1983): Diagnosing the experience curve. In: *Journal of Marketing* 47, S. 44–58.
- Droste-Franke, B.; Fohr, G.; Voge, M.; Nietgen, T.; Doren, D.; Weidle, M.; O’Sullivan, M.; Deissenroth, M.; Nitsch, F.; Jacqué, K. (2020): Simulation von Innovationsdynamiken neuer Schlüsseltechnologien im Energiebereich am Beispiel von Lithium-Batterien: Schlussbericht: Laufzeit vom 01.09.2016 bis 28.02.2020. Bad Neuenahr-Ahrweiler.
<https://doi.org/10.2314/KXP:1750375737>
- Forum für Energiemodelle und Energiewirtschaftliche Systemanalysen in Deutschland (2006): Ansätze zur Modellierung von Innovation in der Energiewirtschaft, Modellexperiment V, Endbericht, Berlin.
- Funke, S. Á.; Plötz, P. (2017): A techno-economic analysis of fast charging needs in Germany for different ranges of battery electric vehicles. In: *Proceedings to the European Electric Vehicle Congress (EEVC), 14th – 16th March 2017, Geneva, Switzerland.*
- Gilbert, N.; Pyka, A.; Ahrweiler, P. (2001): Innovation networks - a simulation approach. In: *Journal of Artificial Societies and Social Simulation.*
- Héraud, J.-A. (2003): Regional Innovation Systems and European Research Policy: Convergence or Misunderstanding? In: *European Planning Studies*, 11 (1), S. 41-56.
- Hodbod, J.; Adger, W.N. (2014): Integrating social-ecological dynamics and resilience into energy systems research. *Energy Res. Soc. Sci.* 2014, 1, 226–231
- International Energy Agency (2000): *Experience Curves for Energy Technology Policy.* OECD.
- Kim, S.-M., Kim, J.-H. (2020): Households’ Willingness to Pay for Substituting Natural Gas with Renewable Methane: A Contingent Valuation Experiment in South Korea. In: *Energies*
- Numata, M.; Sugiyama, M.; Swe, W.; del Barrio Alvarez, D. (2021): Willingness to Pay for Renewable Energy in Myanmar: Energy Source Preference. *Energies* 2021, 14, 1505.
<https://doi.org/10.3390/en14051505>
- Pfenninger, S.; Hawkes, A.; Keirstead, J. (2014): Energy systems modeling for twenty-first century energy challenges. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 2014, 33, 74–86.
- REEEM Project. (2019). REEEM-D4.1a_The Role of Behaviour and Heterogeneity for the Adoption of Technologies (Version 1). Zenodo. <https://doi.org/10.5281/zenodo.3368502>, zuletzt geprüft am: 21.12.2023.
- Rout, Ullash Kumar (2006): *Modelling of Endogenous Technological Learning of Energy Technologies - an Analysis with a Global Multiregional Energy System Model*, Doctoral thesis.
- Rubin, E. S.; Azevedo, I. M.; Jaramillo, P.; Yeh, S. (2015): A review of learning rates for electricity supply technologies. In: *Energy Policy* 86, S. 198–218.
- Senkpiel, C., Dobbins, A., Kockel, C., Steinbach, J., Fahl, U., Wille, F., Globisch, J., Wassermann, S., Droste-Franke, B., Hauser, W., Hofer, C., Nolting, L., Bernath, C. (2020): Integrating Methods and Empirical Findings from Social and Behavioural Sciences into Energy System Models—Motivation and Possible Approaches. In: *Energies* 13, 4951.
<https://doi.org/10.3390/en13184951>

Sovacool, B.K. (2014): Diversity: Energy studies need social science. *Nature* 2014, 511, 529–530.

Toyota Deutschland GmbH (2015): Toyota Prius Plug-in Hybrid. Online verfügbar unter <http://www.toyota.de/automobile/prius-plugin/index.json>, zuletzt geprüft am 12.04.2015.

Watanabe, C.; Wakabayashi, K.; Miyazawa, T. (2000): Industrial dynamism and the creation of a “virtuous cycle” between R&D, market growth and price reduction: The case of photovoltaic power generation (PV) development in Japan. In: *Technovation* 20, S. 299–312.

Wietschel, M.; Gnann, T.; Kühn, A.; Plötz, P.; Moll, C.; Speth, D.; Buch, J. (2017): Machbarkeitsstudie zur Ermittlung der Potentiale des Hybrid-Oberleitungs-Lkw. Studie im Rahmen der Wissenschaftlichen Beratung des BMVI zur Mobilitäts- und Kraftstoffstrategie. Karlsruhe: Fraunhofer ISI.

A.1.6 Meilenstein-Dokument 7: Dokument zum methodischen Potential der Projektergebnisse für die Modellierung von Technikakzeptanz, Hemmnisanalysen sowie der Simulation und Analyse regulatorischer Rahmenbedingungen

Evaluation von Politikinstrumenten und Szenari- entwicklung durch Modellkopplung

Bericht zum Meilenstein 7

Ort: Karlsruhe

Datum: Dezember 2023

Impressum

MANIFOLD

Projektleitung

Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung ISI

Breslauer Straße 48, 76139 Karlsruhe
Heike Brugger, heike.brugger@isi.fraunhofer.de

Autorinnen und Autoren

Jan Steinbach
Institut für Ressourceneffizienz und Energiestrategien (IREES), Karlsruhe

Heike Brugger, Alexandra Pröpper, Christiane Bernath
Fraunhofer Institut für System- und Innovationsforschung (ISI), Karlsruhe

Davy van Doren, Bert Droste-Franke, Markus Voge
Institut für qualifizierende Innovationsforschung und -beratung (IQIB), Bad Neuenahr-Ahrweiler

Audrey Dobbins, Ulrich Fahl, Kerstin Haller
Institut für Energiewirtschaft und Rationelle Energieanwendung (IER), Universität Stuttgart

Charlotte Senkpiel, Connor Thelen, Hannah Nolte, Christoph Kost
Fraunhofer Institut für Solare Energiesysteme (ISE), Freiburg

Christina Kockel, Jakob Kulawik
Institute for Future Energy Consumer Needs and Behavior (FCN), RWTH Aachen University

Farina Wille
Technische Universität Braunschweig, Institut für Psychologie, Abteilung für Psychologische Methodenlehre und Biopsychologie (IPMB)

Hinweise

Diese Arbeit wurde durch das Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK) gefördert.

© Fraunhofer ISI, IQIB GmbH, IER Universität Stuttgart, ZIRIUS Universität Stuttgart, IREES GmbH, Fraunhofer ISE, FCN RWTH Aachen University, IPMB TU Braunschweig (2023) Manifold. Evaluation von Politikinstrumenten und Szenarienentwicklung durch Modellkopplung. Bericht zum Meilenstein 7. Karlsruhe

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 Auftraggebers wider.

Inhalt

Impressum	2
1 Einleitung	6
2 Operationalisierung der Modellschnittstellen	7
2.1 Überblick zu den Modellen und den Modellschnittstellen	7
2.2 Integration der Discrete-Choice-Ergebnisse in die Diffusionsmodelle	7
2.2.1 Parametrisierung von Invert/ee-lab	7
2.2.2 Parametrisierung von TAM	9
2.1 Iteration zwischen Diffusionsmodelle und Technologiegenese.....	10
2.1.1 Parametrisierung von Invert/ee-lab	11
2.1.2 Parametrisierung von TAM	12
2.2 Integration der Diffusionsergebnisse in die Systemmodelle.....	13
2.2.1 Parametrisierung von REMod	13
3 Definition der Szenarien und Politikinstrumente	14
3.1 Ausgangslage und Szenariendefinition.....	14
3.1.1 Referenzszenario	19
3.1.2 Szenario 1: Technologieoffenheit.....	20
3.1.3 Szenario 2: Transformation zu kostenoptimalen Pfaden mit Fokus auf Innovationssystem.....	22
3.1.4 Szenario 3: Transformation zu kostenoptimalen Pfaden mit Fokus auf Nachfrage	23
4 Ergebnisse	25
4.1 Ergebnisse der Modellierung sozio-politischer Akzeptanz	25
4.1.1 Szenarienvergleich.....	27
4.1.2 Diskussion.....	34
4.2 Ergebnisse der Technologiegenese- und Lernkurvenmodellierung	35
4.2.1 Simulationsansatz	35
4.2.2 Politische Maßnahmen.....	36
4.2.3 Technologieentwicklung	42
4.2.4 Installateurspopulation	48
4.2.5 Fazit.....	54
4.3 Ergebnisse der Diffusionsmodelle	55
4.3.1 Modellergebnisse Invert-ee/lab unter Berücksichtigung von Technologiegenese und Entscheidungsverhalten	55
4.3.2 Modellergebnisse TAM unter Berücksichtigung von Technologiegenese und Entscheidungsverhalten	59
5 Szenarienergebnisse der gesamtsystemischen Modellierung	65
5.1 Ergebnisse der Modellierung mit REMod.....	65
5.1.1 Rahmendaten und Szenarien	65
5.1.2 Notwendige Anpassung der Rahmendaten.....	65

5.1.3	Ergebnisse	66
5.2	Ergebnisse der Modellierung mit Enertile	79
5.2.1	Kopplung von Invert und Enertile	79
5.2.2	Rahmenbedingungen der Szenarien in Enertile.....	79
5.2.3	Ergebnisse	79
6	Abbildungsverzeichnis.....	94
7	Tabellenverzeichnis	97
8	Literaturverzeichnis	98

1 Einleitung

Der Manifold-Bericht zum Meilenstein 7 dokumentiert die Ergebnisse der im Rahmen von Manifold durchgeführten Szenarienanalyse basierend auf der Modellkopplung. Aufbauend auf dem Manifold-Bericht zum Meilenstein 6 konkretisiert der Bericht die Operationalisierung und Parametrisierung der Modellkopplung. Darauf aufbauend werden die untersuchten Szenarien definiert und beschrieben.

Insgesamt werden vier Szenarien untersucht. Ein Referenzszenario und drei Politiksznarien mit denen die Klimaschutzziele erreicht werden sollen. Im Referenzszenario werden die derzeitigen politischen Rahmenbedingungen möglichst detailliert in den Modellen abgebildet und bis zum Jahr 2045 fortgeschrieben. Für die Politiksznarien werden unterschiedlichen Narrative unterstellt, aus denen entsprechende Instrumente abgeleitet werden. Im Szenario „Technologieoffenheit“ werden Instrumente definiert, mit denen im Gebäudesektor eine möglichst technologieoffen Anreizwirkung entsteht. Insbesondere gibt es keine Einschränkung für Technologie, die in Zukunft das Potential zur Nutzung THG-neutraler Brennstoffe verfügen. Im Szenario „Fokus Innovationssystem“ wird ein Fokus auf die Technologieentwicklung und die Aus- und Weiterbildung zur Implementierung von zielkonformer Wärmeversorgung in einem kostenoptimalen Pfad aus Gesamtsystemebene gelegt. Im Szenario „Fokus Nachfrageseite“ liegt der Fokus auf der technologiespezifischen Anreizwirkung von zielkonformer Wärmeversorgung auf der Nachfrageseite.

Die Modellierung erfolgt entsprechend des Manifold-Ansatzes als explorativer Ansatz für den Gebäudesektor, der die Zusammenhänge von Entscheidung auf Gebäudeebene und Markt- und Innovationssysteme integriert simuliert. D.h. es ergeben sich unterschiedliche Pfade auf Grundlage der definierten Rahmenbedingungen und der individuellen Entscheidungen sowie der Entwicklung im Markt- und Innovationssystem. Erst mit der Übergabe der Ergebnisse in die gesamtsystemische Ebene erfolgt die Sicherstellung der Zielerreichung bis zum Jahr 2045.

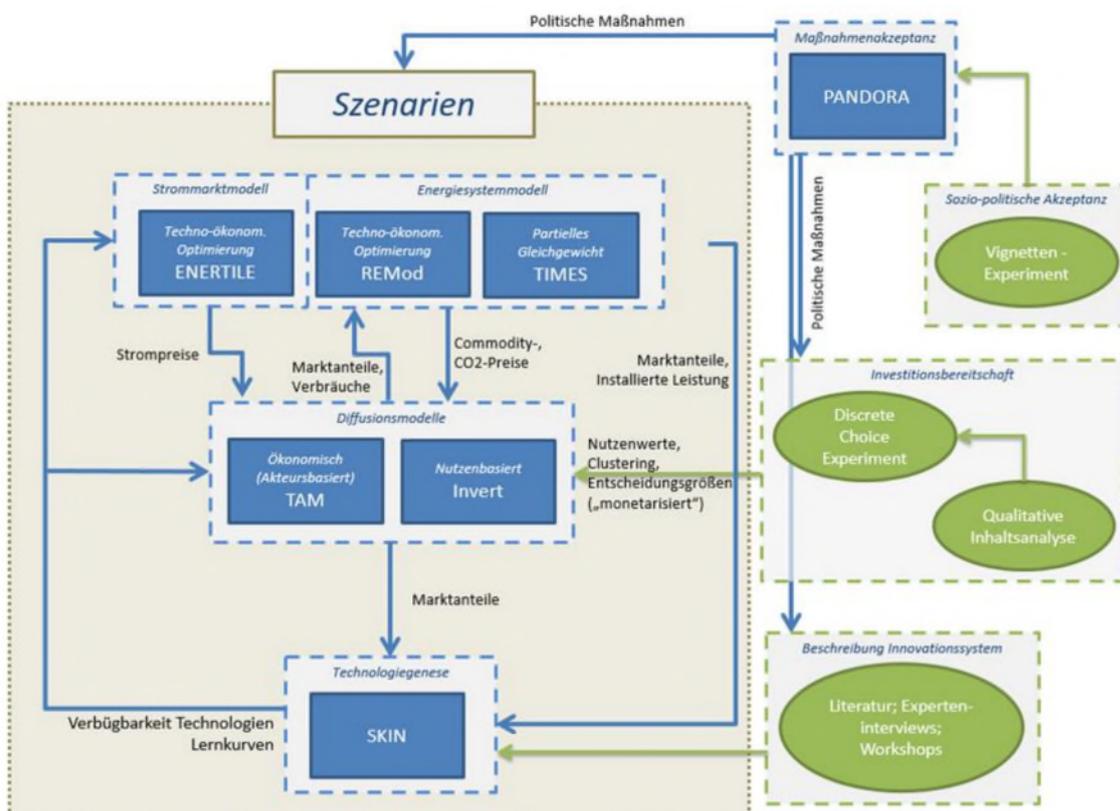
Die Ergebnisdarstellung der Szenarien erfolgt anhand der verwendeten Modelle und wie diese aufeinander aufbauen. Zunächst erfolgt die Darstellung der Ergebnisse zur sozio-politischen Akzeptanz mit dem im Rahmen des Projektes neu entwickelten Modell Pandora. Als zweites werden die Ergebnisse der Technologiegenese mit dem Modell SKIN dargestellt, die in die Diffusionsmodelle Invert/ee-lab und TAM integriert werden. Die Ergebnisse von Invert/ee-lab und TAM stellen die möglichen Entwicklungspfade für den Gebäudesektor dar und werden in Kapitel 4 dargestellt. Die Ergebnisse von Invert/ee-lab werden in weiterer Folge in das Strommarktmodell Enertile und das Gesamtenergiesystemmodell Remod integriert. Die Szenarienergebnisse mit Enertile und Remod werden in Kapitel 5 des Berichtes diskutiert.

2 Operationalisierung der Modellschnittstellen

2.1 Überblick zu den Modellen und den Modellschnittstellen

Für die detaillierte Beschreibung der im Projekt angewendeten, weiterentwickelten und zusammengeführten Energiesystemmodelle sei auf Berichte zum Meilenstein 5 und 6 verwiesen. Abbildung 1 zeigt daraus den Überblick zu den resultierenden Schnittstellen für die Manifold-Modelle, deren Operationalisierung für die Berechnung der Szenarien im Folgenden näher darstellt werden

Abbildung 1: Modellschnittstellen und Modellintegration in Manifold



2.2 Integration der Discrete-Choice-Ergebnisse in die Diffusionsmodelle

Die Ergebnisse des Discrete Choice Experiments (DCE) werden in die Diffusionsmodelle Invert/ee-lab und TAM integriert. Da der erste Modelllauf von Invert/ee-lab als Grundlage für SKIN dient, gehen die DCE indirekt somit auch in SKIN ein.

2.2.1 Parametrisierung von Invert/ee-lab

Der Algorithmus zur Simulation der Investitionsentscheidung in Wärmeversorgungssysteme in Invert/ee-lab basiert auf einem Logit-Modell, wodurch grundsätzlich eine hohe Passbarkeit mit dem

DCE ermöglicht ist. Allerdings werden die die einzelnen Teilnutzwerte unterschiedlicher Entscheidungsparameter bisher über Gewichtungsfaktoren zu einem Gesamtnutzwert zusammengefasst auf deren Grundlage dann die Berechnung der Wahlwahrscheinlichkeiten bzw. Marktanteile erfolgt (vgl. Steinbach 2016). Das implementierte Logit-Modell ist dabei ein Nested-Logit Modell, welches es erlaubt ähnliche Technologien und Technologiekombinationen in der Modellierung abzubilden (vgl. Train xxx). Die jeweiligen Gewichtungsfaktoren werden im Modell agentenspezifisch in den Eingangsdaten definiert. Der bisherige Algorithmus sieht vor, dass die einzelnen Teilnutzwerte zunächst auf eine einheitliche Skala normiert werden und dann mit den definierten Gewichtungsfaktoren multipliziert werden. Die Normierung der Ausprägung der Teilnutzenwerten ermöglicht es, dass Entscheidungsparameter mit unterschiedlichen Einheiten in Verhältnis gesetzt und so beispielsweise ökonomische und nicht ökonomische Kalküle in der Simulation der Investitionsentscheidung berücksichtigt werden können. Die Gewichtungsfaktoren sind dabei als prozentueller Anteil definiert, der das jeweilige Gewicht eines Entscheidungskriteriums für die Entscheidung eines bestimmten Agenten (Gebäudeeigentümer) angibt. Die Summe über die Gewichtungsfaktoren aller Entscheidungskriterien ergibt dabei 100 Prozent. Dieser Ansatz eignet sich gut für eine generische Definition oder eine Ableitung von relativen Gewichtungsfaktoren aus der Literatur. Die relative Gewichtung der einzelnen Entscheidungsparameter sind dabei direkt sichtbar – z.B. 30 Prozent Gewicht auf Investitionskosten, 40 Prozent auf CO₂-Emissioneseinsparungen. Neben dem Vergleich der relativen Vorteilhaftigkeit unterschiedlicher Alternativen können zudem auch einfache Entscheidungsheuristiken abgebildet werden, deren Grundlage in vielen Entscheidungssituationen auch empirisch belegt ist (Goldstein and Gigerenzer 1999).

Allerdings ist durch die Normierung der Parameterausprägung in Teilnutzenwerte keine direkte Implementierung von Ergebnissen eines DCE gegeben und die direkte Integration empirischer Ergebnisse zu Entscheidungsfindung ist nicht möglich. Im Rahmen von Manifold ist der Simulationsalgorithmus von Invert/es-lab daher erweitert worden, so dass die aus der DCE resultierenden empirisch gewonnen Parameter direkt in das Modell eingehen. Die Beta-Parameter aus dem DCE beinhalten neben der relativen Gewichtung der Entscheidungskriterien zueinander auch gleichzeitig die Transformation bzw. Normierung der Parameterausprägungen zueinander. Damit können beispielsweise die Relevanz von Investitionskosten in Verhältnis zu Energieeinsparungen oder dem Betriebsaufwand gesetzt werden, obwohl diese Parameter über unterschiedliche Einheiten verfügen. Für Anpassung im Modell wird dazu eine neue Agentenklasse „Manifold-Agent“ programmiert, für die der neue Simulationsalgorithmus aufgerufen wird. Alle Agenten, die im Modell dieser Agentenklasse zugeordnet sind, verwenden die definierten Beta-Gewichtungsfaktoren direkt in der Nutzwertkalkulation, ohne eine Transformation der Ausprägung auf eine einheitliche Skala vorzunehmen. Der ursprüngliche Algorithmus bleibt zudem erhalten und es können Vergleiche zwischen den unterschiedlichen Ansätzen modelliert werden.

Die Parametrisierung der Beta-Faktoren wird direkt aus dem DCE übernommen. Aus dem DCE konnte keine klare Clusterung unterschiedlicher Gebäudeeigentümer (Agenten) identifiziert werden, so dass für die Szenarien Modellierung in dem Bereich der selbstnutzenden Eigentümer mit den resultierenden Durchschnittswerten gerechnet wird. Im Modell sind die Nutzwerte zudem umgekehrt skaliert, so dass die Wahlwahrscheinlichkeit höher ausfällt, je geringer der Nutzwert ist. Daher werden die Vorzeichen der Beta-Werte aus dem DCE umgekehrt.

Tabelle 1 gibt einen Überblick welche Faktoren im Modell aus dem DCE direkt übernommen werden.

Tabelle 1: Ausprägung der Gewichtungparameter (beta-values) in Invert/ee-lab basierend auf dem DCE

Entscheidungsparameter	Einheit	β_α (beta-Value) *(-1)
Investitionskosten [inves]	[1000 EURO]	0.133
Energie- /Betriebskosten [opera]	[1000 EURO]	1.856
CO2-Emissionen [co2em]	[kg/Jahr]	-0.008
Betriebsaufwand [tim]	[Tage pro Jahr]	0.062

Folgende Formel zeigt die Parametrisierung der DCE Ergebnissen im Invert/ee-lab zur Berechnung der relativen Vorteilhaftigkeit der einzelnen Wärmeversorgungstechnologien und der daraus resultierenden Marktanteile. Dabei ist die Formel für die Berechnung der Marktanteile aus Grund der Lesbarkeit als multinominales Logit-Modell dargestellt. Da im Invert/ee-lab Modell auch verschiedene Ausprägungen gleichartiger Technologien berücksichtigt werden können, beispielsweise unterschiedliche Arten von Wärmepumpen, ist die Berechnung als Nested-Logit-Modell implementiert, welches zunächst die Marktanteile zunächst für die übergeordneten Technologiekategorien (z.B. alle Wärmepumpen, alle Gasttechnologien) ermittelt und dann die Anteile innerhalb der Technologiekategorien (Nester) berechnet.

$$V_{j,bu,in,t} = inves_{j,bu,t} \cdot \beta_{inves,in} + opera_{j,bu,t} \cdot \beta_{opera,in} + co2em_{j,bu,t} \cdot \beta_{co2em,in} + tim_{j,bu,t} \cdot \beta_{tim,in} \tag{1}$$

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

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

$V_{j,bu,in,t}$ *Kalkulierter Nutzwert von Wärmeversorgungstechnologie j in Gebäude bu für Investor-Agent in*

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

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

λ *Skalierungsparameter*

2.2.2 Parametrisierung von TAM

Die Ergebnisse der empirischen Erhebung fließen in die Szenarienmodellierung in TAM ein. Die Daten werden dabei verwendet, um individuelle Entscheidungskalküle der Gebäudeeigentümer zu berücksichtigen und damit Entwicklungen der Marktanteile unterschiedlicher Wärmeversorgungstechnologien verbessert abschätzen zu können. Strukturelle Unterschiede der Nutzerpräferenzen in Ab-

hängigkeit des jeweiligen soziodemographischen Hintergrundes werden dabei durch eine Betrachtung unterschiedlicher Cluster berücksichtigt. Die übergebenen Daten enthalten aus diesem Grund neben den Ergebnissen für die gesamte Stichprobe auch Ergebnisse für folgende ausgewählte soziodemographischen Faktoren:

- Stadt-Land
- Eigentümer-Mieter
- Nettohaushaltseinkommen

Im Modell TAM-HH, in dem eine Disaggregation der Akteure vorhanden ist, werden diese soziodemographischen Faktoren mittels der Methode der Budget Constraints integriert. Die theoretischen und konzeptionellen Details dazu werden im Meilensteinbericht 6 näher erläutert.

Grundsätzlich ist es denkbar, sämtliche untersuchten Attribute über geeignete, spezifische Methodiken der Budget Constraints in TAM abzubilden. Dabei können jedoch nur die unterschiedlichen Kombinationen und Attribute verwendet werden, deren Stichproben einerseits genügend groß waren und sich andererseits mit den bereits in TAM vorgehaltenen Akteursgruppen decken.

Das Discrete-Choice-Experiment umfasst neben der Zahlungsbereitschaft zur Recherche und den Betriebs- und Investitionskosten insbesondere auch einen Indikator zur CO₂-Emissionsreduktion, der sich als Indikator zur Zahlungsbereitschaft und Integration in TIMES eignet: Dazu erfolgte eine Bewertung der einzelnen Technologien im Vergleich zur Referenztechnologie eines Gas-Brennwertkessels und damit eine monetäre Bewertung im gleichen Verhältnis wie die CO₂-Emissionsreduktion. Somit wurden die einzelnen Heizsysteme jeweils mit einem Bonus bzw. Malus ausgestattet. Auch für die weiteren Indikatoren sind analoge Bonus- bzw. Malusbelegungen umsetzbar.

Die Attribute Eigenrecherchen, Fachinstallateur*in, Energieberatung und Zeitaufwand werden nicht bei der Modellintegration berücksichtigt. Hier bedarf es noch konzeptioneller Überlegungen, wie ein direkter Transfer in techno-ökonomische Energiemodelle erfolgen könnte.

2.1 Iteration zwischen Diffusionsmodelle und Technologiegenese

Innerhalb der gesamten Modellierungsarchitektur von Manifold hat SLICK - neben einer Verbindung mit TAM - eine direkte Verbindung mit dem Modell Invert/ee-lab. Für SLICK diente die Kopplung mit INVERT dazu, Nachfragedaten zu den verschiedenen modellierten Heiztechnologien zu erhalten. Als Output generierte SLICK Daten über die Entwicklung von Lernkurven sowie die chronologische Entwicklung der Installateurbasis und der damit verbundenen Technologieportfolios.

Außerdem produzierte SLICK Output-Daten zu den verschiedenen modellierten politischen Maßnahmen (siehe auch Abschnitt 4.2). Durch eine Reihe von Iterationen und Feedback-Runden - zwischen dem Modell-Output von SLICK und INVERT - wurden die Modelle feinabgestimmt und kalibriert.

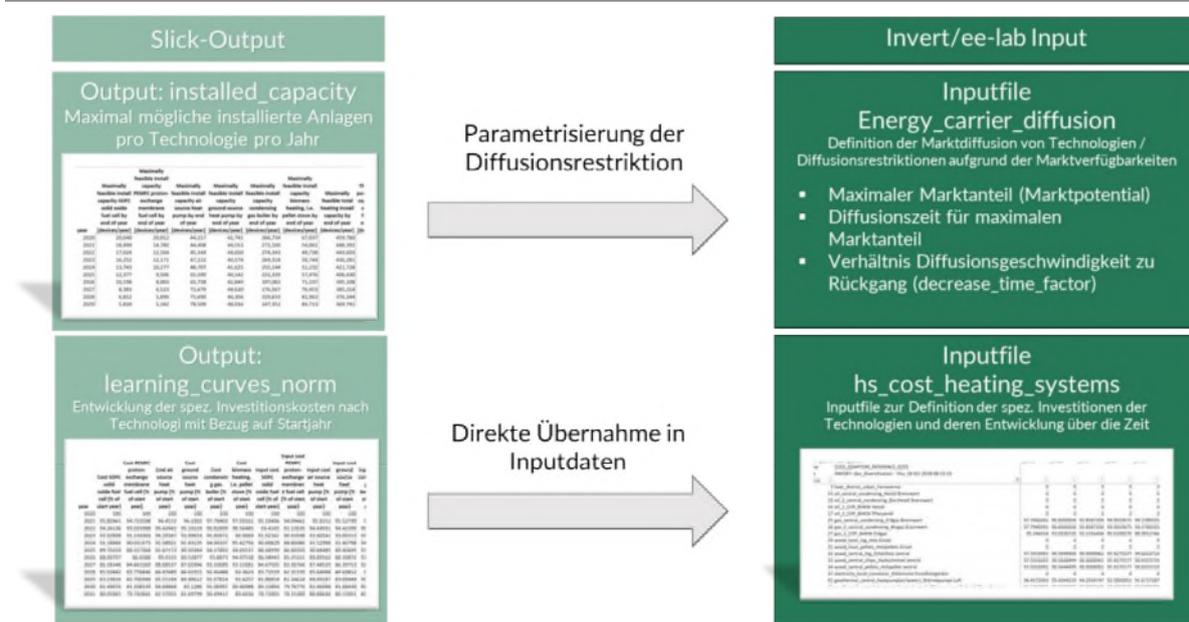
Als Grundlage für die Erstkalibrierung von SLICK dient in jedem Szenario ein Invert/ee-lab Lauf, der die theoretischen Marktanteile unter Berücksichtigung der implementierten DCE Ergebnisse berechnet ohne mögliche Diffusionsbeschränkung durch Technologieverfügbarkeit bzw. Kompetenz- und Technologieportfolio der Installateure.

Im zweiten Iterationsschritt werden die Ergebnisse der SLICK-Modellierung jeweils in die Diffusionsmodelle Invert/ee-lab und TAM. Im Folgenden wird die konkrete Parametrisierung beschrieben.

2.1.1 Parametrisierung von Invert/ee-lab

Um die SLICK Ergebnisse effizient in Invert/ee-lab übernehmen zu können wird ein Transfermodul erstellt, welches die Slick-Ergebnisse einliest und in die relevanten Inputdaten für Invert/ee-lab überführt. Dazu können die Parameter nicht direkt übernommen werden, sondern müssen noch in die mit dem Modell kompatible Form gebracht werden. Abbildung 2 skizziert die Parametrisierung von Invert/ee-lab mit dem Output von SLICK für die jeweiligen Szenarien. Aus SLICK resultieren absolute und normierte Entwicklung für die maximalen Marktanteile der einzelnen Technologien basierend auf den Szenarien spezifischen Ergebnissen zur Entwicklung der Installateur-Technologieportfolios und der Marktverfügbarkeit von Technologien sowie deren Kosten bzw. die Entwicklung der spezifischen Investitionskosten. Letztere können direkt im Invert/ee-lab Modell übernommen werden. Die Technologiekosten werden für das Ausgangsjahr definiert und eine mögliche Änderung kann jahresscharf in den Inputdaten als relativer Wert mit Bezug auf die Ausgangskosten definiert werden, genau wie es aus dem SLICK Modell als Output resultiert.

Abbildung 2: Parametrisierung Invert/ee-lab mit SLICK Ergebnissen



Der komplexere Teil ist die Implementierung der Marktdynamiken, die über die ersten Iterationsschritte aus dem Zusammenspiel von Nachfrageimpuls (Marktanteile aus Invert/ee-lab) und der Entwicklung des Markt- und Innovationssystems (SLICK-Modellierung) resultieren. In Invert/ee-lab wird die Kopplung über ein Marktdiffusionsmodell realisiert, das mit den Ergebnissen von SLICK parametrisiert werden. Anhand historischer Daten lässt sich feststellen, dass der Diffusionsprozess von Technologien Fällen Muster aufweist, die sich durch Marktdiffusionsmodelle beschreiben lassen. In Invert/ee-lab ist ein logistisches Diffusionsmodell implementiert mit welchem Ober- und Untergrenzen für die Marktanteile der Technologien ermittelt werden und mit dem die Modellierung der individuellen Entscheidung modellendogen korrigiert werden (vgl. Müller 2015, Seite 105)

Im Gegensatz zur Modellierung der Marktanteile über der oben dargestellten Parametrisierung des agentenbasierten Simulationsalgorithmus mittels des DCE und der Berechnung von Marktanteilen aufgrund individueller Entscheidungskriterien der Nachfrageseite (Gebäudeeigentümer), ermittelt das Marktdiffusionsmodell die Entwicklung von Technologien auf Basis der Gesamtmarktentwicklung über die Zeit. Damit kann berücksichtigt werden, wie schnell sich eine Technologie am Markt

entwickeln kann, in dem die maximalen Änderungsraten basierend auf den Marktanteilen im Vorjahr, der Diffusionsgeschwindigkeit und dem maximalen Marktanteil berechnet werden. Diese Parameter werden anhand der SLICK-Ergebnisse für jedes Szenario als Input definiert. Genau wie beim technologischen Lernen können die Parameter Maximaler Marktanteil, Diffusionszeit zur Erreichung des maximalen Marktanteils sowie das Verhältnis von Marktwachstum zu Marktückgang direkt als Inputdaten für Invert/ee-lab definiert und eingelesen werden. Die Parameter werden aus den jahresscharfen Ergebnissen zu den maximal möglichen installierten Technologien aus den SLICK-Ergebnisse im Transfermodul berechnet.

2.1.2 Parametrisierung von TAM

Die Integration der SLICK-Modellergebnisse in TAM erfolgte in mehreren Iterationsschritten. Zunächst wurde in der Vorbereitung der Modellintegration in mehreren Iterationen erarbeitet, welche Indikatoren aus SLICK sich in TAM auf welche Weise integrieren lassen. Ausgangspunkt war dabei die techno-ökonomische Beschreibung der Technologien. Mittels eines Datentemplates wurden die für die Technologiebeschreibung in TAM-HH relevanten Parameter an SLICK übergeben und unterschiedliche Möglichkeiten der Integration in TAM-HH erörtert.

Als Vorbereitung der Integration der SLICK-Ergebnisse in TAM erfolgte zunächst eine Harmonisierung und geeignete Anpassung der jeweiligen techno-ökonomischen Parameter, insbesondere für die Harmonisierung der Preise für Wärmepumpen und Brennstoffzellen. Dazu erfolgte die Erstellung eines Datentemplates zur geeigneten Übergabe und Harmonisierung der ausgewählten wichtigsten Kenngrößen. Unterschiedliche Möglichkeiten zur Untersuchung der einzelnen Effekte wurden bereits früh im Projektverlauf diskutiert.

Grundsätzlich kann für die Integration der Ergebnisse aus SLICK nun folgendes Vorgehen methodisch durchgeführt werden: Inwieweit wirkt sich eine unterschiedliche Aufteilung des Budgets für Installateure, Subventionen und Ausgaben für F&E für Brennstoffzellen und Wärmepumpen auf die TAM-Modellierungsergebnisse aus?

Zur konkreten Umsetzung der Modellintegration war es zunächst notwendig, das Modell TAM-HH um die Brennstoffzellentechnologien zu erweitern sowie rekursiv geeignete Untersuchungs- und Vergleichsgrößen zu definieren.

Insgesamt erfolgt die Integration über die Marktanteile und Technologiepreise und Effizienzverbesserungen und wird im folgenden Abschnitt näher erläutert.

Dazu werden gemäß den unterschiedlichen Szenarien die Aufteilung eines unterschiedlichen Budgets in die drei Schwerpunktpfade F&E, Subventionen und Handwerker gerechnet. Es erfolgt eine Harmonisierung der jeweiligen Technologiepreise, Subventionen werden beispielsweise über niedrigere Preise abgebildet.

- Marktanteile
 - In TAM-HHs werden Marktanteile durch Infrastrukturlimitierungen nach Gebäudetyp und der Verfügbarkeit von Energieversorgungsarten (z. B. Gasnetz, PV-Potenzial, Wärmepumpeninstallation) bestimmt.
 - In SLICK werden Marktanteile gesteigert mit dem Ziel, Infrastrukturverbesserungen abbilden zu können. Diese werden in der Charakterisierung der unterschiedlichen Profile für Stadt/Land, Gebäudetyp und ihren jeweiligen Zugang zur Energieinfrastruktur entsprechend abgebildet.
- Technologiepreis und Effizienzverbesserungen

- In TAM-HHs werden die Preise für Heizungstechnologien bestimmt als die gesamten Anschaffungskosten für Verbraucher. Diese umfassen Investitionskosten, Installationskosten, ggf. Renovierungskosten und weitere anteilige Preiskomponenten.
- Die Kostendaten und -informationen aus SLICK werden in TAM innerhalb der disaggregierten Preiskomponenten berücksichtigt. Auf diese Weise wird der Einfluss unterschiedlicher Preise erhöht z. B. durch geringere Arbeitskosten oder höhere Materialkosten. So kann das Verbraucherverhalten realitätsnäher im Modell abgebildet und untersucht werden.

2.2 Integration der Diffusionsergebnisse in die Systemmodelle

2.2.1 Parametrisierung von REMod

Zur Abbildung der Effekte von Innovations- und Diffusionsverhalten hinsichtlich des Austauschs von Heiztechnologien wird eine Modellkopplung zwischen dem Diffusionsmodell Invert/EE-Lab sowie dem Energiesystemmodell REMod etabliert. Eine ausführliche Beschreibung des Modells REMod findet sich [hier](#). Für diesen Zweck werden die Szenarienergebnisse der dargestellten Politikszenerarien (Kapitel 3.1.2 bis 3.1.4) des Modells Invert/EE-Lab, welche die Ergebnisse des Innovationsmodells SLICK berücksichtigen (siehe Kapitel 2.2.1 und 2.1.1), sowie das modellinhärente Diffusionsverhalten berücksichtigt.

Im Energiesystemmodell REMod werden hierfür die in Invert/EE-Lab resultierenden, jährlichen Marktanteile der Heiztechnologien vorgegeben, sodass in REMod der sonst optimierte Technologiemix im Gebäudebereich vorgegeben ist. Diese Kopplung ermöglicht eine Quantifizierung intersektoraler Effekte, die implizit durch das Akteursverhalten im Innovations- und Diffusionskontext im Gebäudebereich entstehen. Hierbei ist zu berücksichtigen, dass die anderen Verbrauchssektoren (Industrie und Verkehr) sowie der Energiebereitstellungssektor in REMod weiterhin optimiert werden. Die Zielgröße der Optimierung des gesamten Systems mit REMod ist die Minimierung der Transformationskosten des gesamten Energiesystems. Dabei gilt die Einhaltung der energiebezogenen Klimaschutzziele der Bundesregierung als strikte Randbedingung. Dies wird durch die Einhaltung des Zielwerts im Jahr 2030 (-65% der CO₂-Emissionen im Vergleich zu 1990) sowie der Einhaltung eines Budgets von 7,8 Gt CO₂ im Zeitraum 2020 bis 2045 operationalisiert.

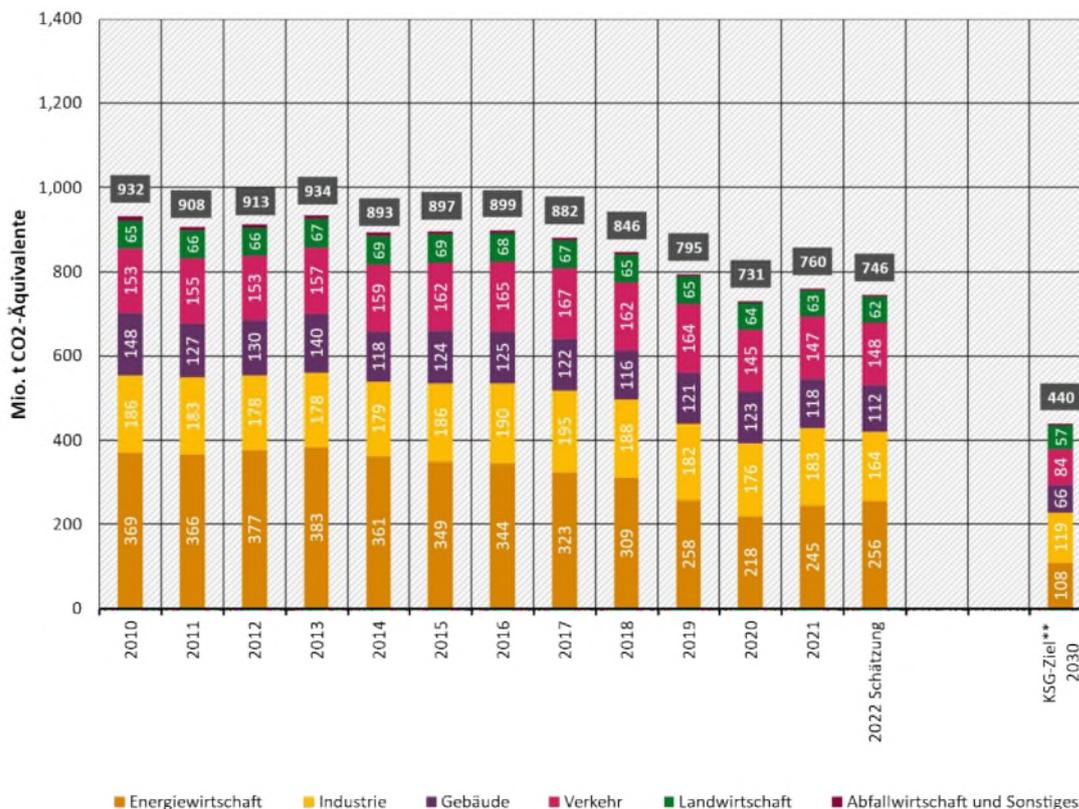
3 Definition der Szenarien und Politikinstrumente

3.1 Ausgangslage und Szenariendefinition

Die Bundesregierung hat mit dem Klimaschutzgesetz ein Ziel der Treibhausgasneutralität für alle Sektoren bis 2045 gesetzt. Für das Jahr 2030 sollen die Emissionen um 65% gegenüber 1990 gesunken sein. Für den Gebäudesektor bedeutet dies für 2030 eine Minderung der Emissionen um bis zu 67% gegenüber 1990. Ein klimaneutraler Gebäudebestand bedeutet eine 100%ige Reduktion der THG-Emissionen im Gebäudesektor. Das Ziel des Gebäudesektors wurde allerdings in den Jahren 2020 bis 2022 verfehlt (Abbildung 3), weshalb im Rahmen des Klimaschutzgesetzes mit Sofortprogrammen gegengesteuert wurde. Laut dem Koalitionsvertrag 2021–2025 sollen die Klimaschutzziele durch „passgenaue und technologieoffene Maßnahmen aus Optimierung der Gebäudehülle, der technischen Anlagen zur Erzeugung und Versorgung mit erneuerbarer Energie am Gebäude und Quartierslösungen“ erreicht werden. Im Rahmen der Novelle des Gebäudeenergiegesetzes (GES) ist Mitte 2023 die sogenannte „65% Pflicht“ eingeführt worden, welche Gebäudeeigentümer:innen im Gebäudebestand verpflichtet mindestens 65 % erneuerbare Energien zu nutzen, sobald der Heizungskessel getauscht wird. Die 65 % Pflicht ist dabei mit dem neuen Gesetz zur kommunalen Wärmeplanung verbunden, so dass die Verpflichtung erst greift, sobald eine kommunale Wärmeplanung für das entsprechende Gemeindegebiet vorliegt. Diese Politikentwicklung konnten im Rahmen des Manifoldprojektes nur bedingt berücksichtigt werden, da die Definition der Szenarien und die damit verbundene Vorbereitung der Modelle vor den politischen Entschlüssen lag.

Einige Entwicklungen sind jedoch in den untersuchten Politikszenerarien antizipiert worden, so dass mit der Anwendung der in Manifold entwickelten Modellkopplung hochrelevante Fragestellungen mit Bezug auf die Wirkung von Politikinstrumenten und der Interaktion auf unterschiedlichen Ebenen – Entscheidungskalküle und Akzeptanz bei Gebäudeeigentümer:innen, Diffusionsgeschwindigkeiten von Technologien im Handwerk und technologischen Lernen – integriert untersucht werden konnten.

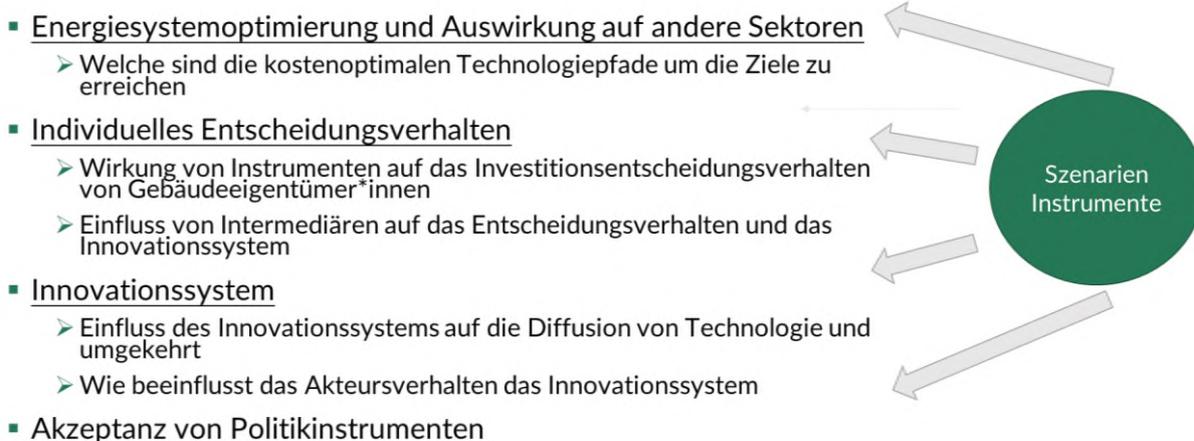
Abbildung 3: Entwicklung der THG-Emissionen und Zielsetzung Gebäudesektor nach Klimaschutzgesetz



Quelle: Umweltbundesamt (2023). Emissionsdaten nach Sektoren im Bundesklimaschutzgesetz 1990 bis 2022. Stand: 15.03.2023

Im Rahmen des Manifoldprojektes werden vier Szenarien – Referenzszenario und drei Politikszenarien- mit dem Modellzusammenschluss modelliert. Der Szenarienzeitraum ist von 2020 bis 2045, mit 2045 als Zieljahr zur Erreichung der Klimaneutralität in Deutschland. In allen Szenarien werden die empirischen Daten, deren Modellintegration und methodischen Modellerweiterungen, die im Rahmen des Forschungsprojektes erarbeitet worden berücksichtigt. Die Unterscheidung der Szenarien erfolgt dementsprechend anhand der Abbildung unterschiedlicher Instrumente, die auf die verschiedenen Dimensionen im Energiesystem wirken und durch den Modellzusammenschluss in Manifold abgedeckt werden können

Abbildung 4: Berücksichtigte Dimensionen bei der Instrumentendefinition in der Szenarienmodellierung

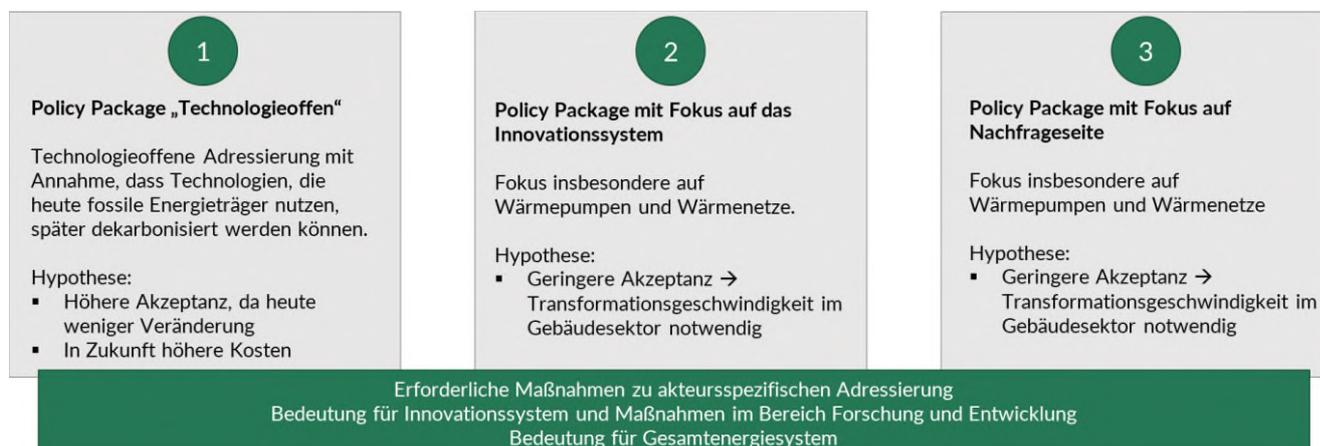


Im **Referenzszenario** werden die derzeitigen politische Rahmenbedingungen möglichst detailliert in den Modellen abgebildet und bis zum Jahr 2045 fortgeschrieben. Die Instrumente des Referenzszenarios werden in den Politikscenarien teilweise übernommen, angepasst oder auch komplett eingestellt.

Für die **Politikscenarien** werden unterschiedlichen Narrative unterstellt, aus denen entsprechende Instrumente abgeleitet werden:

- Politikscenario 1 „Technologieoffenheit“ definiert Instrumente, mit denen im Gebäudesektor eine möglichst technologieoffene Anreizwirkung entsteht. Insbesondere gibt es keine Einschränkung für Technologie, die in Zukunft das Potential zur Nutzung THG-neutraler Brennstoffe verfügen
- Politikscenario 2 „Fokus Innovationssystem“: In diesem Szenario wird ein Fokus auf die Technologieentwicklung und die Aus- und Weiterbildung zur Implementierung von zielkonformer Wärmeversorgung in einem kostenoptimalen Pfad aus Gesamtsystemebene gelegt.
- Politikscenario 3 „Fokus Nachfrageseite“: In diesem Szenario liegt der Fokus auf der technologiespezifischen Anreizwirkung von zielkonformeren Wärmeversorgung auf der Nachfrageseite in einem kostenoptimalen Pfad aus Gesamtsystemebene gelegt

Abbildung 5: Definition der untersuchten Politikscenarien



Für die Definition der Politikszenerarien werden verschiedene Dimensionen berücksichtigt:

- Energiesystemoptimierung und die Betrachtung der Auswirkungen auf andere Sektoren: Hierbei werden die kostenoptimalen Technologiepfade analysiert, um die Ziele 2030 und 2045 zu erreichen
- Individuelles Entscheidungsverhalten: diese Dimension umfasst einerseits die Wirkung von Instrumenten auf das Entscheidungsverhalten von Gebäudeeigentümer:Innen bezüglich der Investitionen. Andererseits aber auch den Einfluss von Intermediären (wie zum Beispiel Heizungsinstallateur:Innen) auf das Entscheidungsverhalten der Akteure und das Innovationssystem im weitesten Sinne.
- Innovationssystem: Die Wechselwirkungen zwischen dem Innovationssystem und der Diffusion von Technologien, sowie das Akteursverhalten innerhalb des Innovationssystems
- Akzeptanz von Politikinstrumenten: Über diese Dimension sollen Fragen bezüglich der Akzeptanz von Politikmaßnahmen und potenzielle soziale Hindernisse innerhalb der Gesellschaft mitgedacht werden, welche die Umsetzung der Maßnahmen in Frage stellen könnten.

Für das zugrundeliegende Forschungsprojekt wurden im ersten Schritt die Narrative für die Szenarien gemeinsam erarbeitet. Dabei sollten die drei Zielszenarien einen ambitionierten Pfad verfolgen und Politikmaßnahmen miteinschließen, die über die Maßnahmen im Referenzszenario hinausgehen. Der Fokus bei allen drei Szenarien liegt insbesondere auf dem politischen Handlungsbedarf das THG-Budget bis 2045 sowie die Klimaneutralität des Gebäudebestandes 2045 zu erreichen. Differenziert wurden drei unterschiedliche Pfade, die an verschiedenen Ebenen greifen, und somit unterschiedliche Politikmaßnahmen beinhalten würden. Neben einem Zielszenario, in welchem eine Strategie der Technologieoffenheit für das Erreichen der Klimaziele angenommen wird, werden zwei verschiedene kostenoptimale Pfade definiert, die ihren Fokus insbesondere auf Wärmepumpen und Wärmenetze setzen. Einen Überblick über die drei Szenarien liefert Tabelle 2.

Im **Szenario Technologieoffenheit** soll analysiert werden mit welchen Konsequenzen der Pfad der Technologieoffenheit zum Erreichen der Ziele einhergeht. Der technologieoffene Ansatz unterstellt, dass die Ziele durch eine Dekarbonisierung der Energieträger im Gebäudesektor auch erreicht werden können, die heute jedoch noch nicht verfügbar sind. Damit resultieren einerseits vermeintlich höhere Gesamtsystemkosten als in einem Szenario, dass die Technologiewahl bereits aufgrund eines kostenoptimalen Pfades stärker steuern vorgibt. Andererseits ist die Annahme, dass dieses Szenario heute auf eine höhere gesellschaftliche Akzeptanz treffen würde, da es wenige Veränderungen und Transformationsdruck für den Gebäudebereich und damit die privaten Haushalte vorsieht.

Im Gegensatz zur Technologieoffenheit im ersten Szenario, wird für die **Szenarien Transformation zu kostenoptimalen Pfad** ein verstärkter Fokus auf die Förderung der Diffusion von Wärmepumpen und den Ausbau der Wärmenetze gesetzt. Es wird dabei versucht die Technologiewahl durch ein verändertes Politikdesign und zusätzliche Instrumente in die Richtung des angestrebten kostenoptimalen Technologiepfades zu steuern. Für beide Szenarien ist die Analyse und Bewertung der gesellschaftlichen Akzeptanz interessant, denn im Vergleich zu Szenario 1 ist könnte die gesellschaftliche Akzeptanz geringer ausfallen. Um die Ziele 2045 zu erreichen ist eine hohe Transformationsgeschwindigkeit im Gebäudesektor bereits heute notwendig. Diese lässt sich nur mit ambitionierten Politiken erreichen, die zum zeitnahen Handeln animieren. Insbesondere einschränkende „Push-Politikmaßnahmen“ können gesellschaftlich abgelehnt werden.

Tabelle 2: Annahme von drei politischen Szenarien für den Bereich Wärme

Szenario	Technologieoffenheit	Transformation zu kostenoptimalem Pfad	Transformation zu kostenoptimalem Pfad
		Policy-Package 1	Policy-Package 2
Beschreibung	Technologieoffene Adressierung mit der Hypothese, dass Technologien, die heute fossile Energieträger nutzen, später dekarbonisiert werden können.	Fokus insbesondere auf Wärmepumpen und Wärmenetze. Starke Förderung von Innovationssystemen	Fokus insbesondere auf Wärmepumpen und Wärmenetze Starke Förderung von Nachfrageseite
Hypothese	Höhere Akzeptanz, da heute weniger Veränderung stattfindet In Zukunft wären höhere Kosten zu erwarten	Geringere Akzeptanz → Transformationsgeschwindigkeit im Gebäudesektor notwendig	Geringere Akzeptanz → Transformationsgeschwindigkeit im Gebäudesektor notwendig
Erreichung Budget bis 2045	✓	✓	✓
Erreichung 2045 Ziele	✓	✓	✓ ¹
Erreichung 2030 Ziele		✓	
Fokus Innovationssystem		✓	
Fokus Akzeptanz	Hohe Akzeptanz	Niedrigere Akzeptanz im Vergleich zu PP2 – Abhängig von der Art der Politikmaßnahmen	Höhere Akzeptanz im Vergleich zu PP1
Fokus Energiesystemkosten	✓	✓ ²	
Fokus Fachkräfte		✓	
	Technologieoffen aber mit welchen Konsequenzen	"Klimaschutz jetzt"	

¹ Früheres Erreichen der Ziele möglich

² Kostenoptimaler Pfad

Im Folgenden werden die berücksichtigten Instrumente und deren Ausgestaltung in den einzelnen Szenarien detailliert dargestellt.

3.1.1 Referenzszenario

Das Referenzszenario enthält die derzeitigen Instrumente und Beschlüsse auf nationaler Ebene mit Relevanz für den Gebäudesektor. Für das Referenzszenario wird der Stand der verabschiedeten und bereits bestehenden Instrumente zum Zeitpunkt Ende 2022 berücksichtigt. Bei den Instrumenten, die durch das im Juli 2022 vorgelegte Sofortprogramm für den Gebäudesektor beinhaltet sind wird unterschieden, inwieweit diese sich bereits in der Umsetzung befinden bzw. deren Ausgestaltung bereits eindeutig ist.

Die zentralen Instrumente im Gebäudesektor lassen sich den durch Manifold adressierten Wirkdimensionen zuordnen:

Tabelle 3: Zentrale Instrumente und Wirkdimension entsprechend des Manifold-Ansatzes

Instrumente	Adressierung der Nachfrageseite	Akzeptanz von Politikmaßnahmen	Adressierung des Innovationssystems
Bundesförderung für effiziente Gebäude (BEG)	X		
Steuerliche Förderung der energetischen Gebäudesanierung	X		
Installationsverbot von neuen Ölkesseln	X		X
Gebäudeenergiegesetzes	X	X	
BEHG	X	X	
Modernisierungsumlage	X	X	
Nationales Effizienzlabel für Heizungsanlagen	X		
Innovationsprogramms Zukunft Bau			X
Serielle Sanierung			X
Bundesförderung Effiziente Wärmenetze	X		

Für das Referenzszenario wurden die technologischen und wirtschaftlichen Annahmen zu Preis- und Kostenentwicklungen harmonisiert und mögliche Korridore bestimmt. Hierfür wurden die Rahmendaten aus dem Projektionsbericht 2021 und mit Forschungsprojekt Ariadne als Grundlage verwendet. Im Referenzszenario werden die Politikinstrumente des Mit-Maßnahmen-Szenarios des Projektionsberichts berücksichtigt. Kurzfristige Effekte werden bei der Berechnung des Referenzszenarios nicht berücksichtigt. Dazu zählt zum Beispiel die aktuelle Temperaturabsenkung in öffentlichen Gebäuden oder Veränderungen aufgrund von vermehrtem Arbeiten im Home-Office

Eine detaillierte Beschreibung aller Politikinstrumente und deren Parametrisierung für die Modellierung ist im Anhang enthalten.

3.1.2 Szenario 1: Technologieoffenheit

Das erste Szenario verfolgt die Hypothese, dass heutige Technologien, die fossile Energieträger nutzen, über technologische Lösungen zu einem späteren Zeitpunkt dekarbonisiert werden können.

Das Szenario ist zielkompatibel mit Bezug auf die Zielsetzung 2045. Das Erreichen der Ziele 2030 wird offengelassen, da diese mit dem technologieoffenen Narrativ und der fehlenden Verfügbarkeit von synthetischem erneuerbarem Gas / Wasserstoff vor 2030 schwierig zu erreichen sind.

Für dieses Szenario werden die bestehenden Politikinstrumente des Referenzszenarios entsprechend angepasst, um eine möglichst breite technologische Diffusion klimaneutraler Technologien zu erhalten. Gasbasierte Wärmeerzeugungstechnologien werden als Teil des Lösungsraums verstanden, die zu einem späteren Zeitpunkt dekarbonisiert werden können und weiterhin als Lösung dienen können. Folgende Politikinstrumente bzw. Anpassung des Rechts- und Förderrahmens sind im Vergleich zum Referenzszenario vorgesehen:

- Eine zentrale Anpassung zum Referenzszenario ist, dass ordnungsrechtliche Einschränkungen auf der Nachfrageseite mit Bezug auf gasbasierte Technologien nicht beinhaltet sind und die Förderung für grüne Gase auf die Angebotsseite ausgeweitet werden.
- Um auch gasbasierte Wärmeerzeugungstechnologien klimaneutral zu betreiben wird ein Fokus der Transformation auf die Angebotsseite gelegt, die durch Förderung zum Aufbau von synthetischem erneuerbarem Gas/ Wasserstoff sowie eine Quote zur schrittweisen Dekarbonisierung des Gases operationalisiert wird.
- Für die Modellierung wird angenommen, dass eine schrittweise Dekarbonisierung des Gases über eine Quotierung mit synthetischem erneuerbarem Gas / Wasserstoff für Zeitraum 2030 bis 2035 stattfindet. Diese fängt bei 20 % in 2030 steigt auf 100 % im Jahr 2035. Die Mischpreise aus Erdgas und synthetischen erneuerbaren Gas / Wasserstoff werden in den Nachfragemodellen als Preise berücksichtigt.
- Die Fördersystematik des BEG für erneuerbare Wärmetechnologien wird fortgeschrieben. Um die Technologieoffenheit mit gasbasierten Technologien zu garantieren, erhalten Gebäudeeigentümer für den Bezug von synthetischem erneuerbarem Gas/ Wasserstoff ab 2030 eine OPEX Förderung (klimaneutraler Wärmebezugszuschuss), der sich an der Höhe der Investitionskostenzuschüsse orientiert.
- Die CO₂-Bepreisung über das BEHG wird beibehalten, wobei der Gas Bezug durch die schrittweise Erhöhung des Anteils synthetischer erneuerbarer Gase / Wasserstoff mit entsprechend niedrigeren CO₂-Preise beaufschlagt wird.
- Die bestehende Förderung für Effizienzmaßnahmen im Gebäudebereich wird gegenüber des Referenzszenarios nicht geändert.

Tabelle 4: Zentrale Instrumente und Wirkdimension entsprechend des Manifold-Ansatzes

Instrumente	Anpassung gegenüber Referenzszenario	Adressierung der Nachfrageseite	Akzeptanz von Politikmaßnahmen	Adressierung des Innovationssystem

Bundesförderung für effiziente Gebäude (BEG)	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Gleiche Fördersätze ▪ OPEX-Förderung für Bezug von PtG 	X		
Steuerliche Förderung der energetischen Gebäudesanierung	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Keine Änderung 	X		
Installationsverbot von neuen Ölkesseln	<ul style="list-style-type: none"> ▪ PTL / HVO erlaubt 	X		X
Gebäudeenergiegesetzes	<ul style="list-style-type: none"> ▪ 	X	X	
BEHG	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Keine Änderung/ Gas wird entsprechend des fossilen Anteils bepreist 	X	X	
Modernisierungsumlage	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Keine Änderung 	X	X	
Nationales Effizienzlabel für Heizungsanlagen	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Keine Änderung 	X		
Innovationsprogramms Zukunft Bau	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Keine Änderung 			X
Serielle Sanierung	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Keine Änderung 			X
Bundesförderung Effiziente Wärmenetze	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Keine Änderung 	X		
65 % Pflicht EE-Wärme ab 2024	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Abschaffung 	X	X	
Gesetz für kommunale Wärmeplanung	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Keine Änderung 		X	
Aufbauprogramm und Qualifikationsoffensive Wärmepumpe	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Qualifikationsoffensive für alle Gewerke kein Fokus auf eine Technologie 			X
Zusätzliche Instrumente im Szenario				
Förderung zum Aufbau synthetischem erneuerbaren Gas/ Wasserstoffkapazitäten	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Neu 			X
Quote für die Einspeisung von grünem Gas	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Neu 	X		

3.1.3 Szenario 2: Transformation zu kostenoptimalen Pfaden mit Fokus auf Innovationssystem

Im Gegensatz zur Technologieoffenheit im ersten Szenario, wird für die zwei anderen Szenarien ein verstärkter Fokus auf die Förderung der Diffusion von Wärmepumpen und den Ausbau der Wärmenetze gesetzt. Beim Policy-Package 1 (PP1) wird dabei der Fokus auf eine starke Förderung im Innovationssystem gelegt. Für dieses Szenario werden politische Maßnahmen ausgewählt, welche die Forschung und Entwicklung fördern und die Marktdiffusion von Wärmepumpen und den Ausbau der Wärmenetze beschleunigen sollen. Angelegt als ein sehr ambitioniertes Szenario könnten beim PP1 die 2030-Ziele erreicht werden.

Tabelle 5: Zentrale Instrumente und Wirkdimension entsprechend des Manifold-Ansatzes

Instrumente	Anpassung gegenüber Referenzszenario	Adressierung der Nachfrageseite	Akzeptanz von Politikmaßnahmen	Adressierung des Innovationssystem
Bundeszförderung für effiziente Gebäude (BEG)	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Fokus der Förderung auf Wärmepumpen und Wärmenetzanschluss ▪ Keine Förderung für Biomasse 	X		
Steuerliche Förderung der energetischen Gebäudesanierung	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Keine Änderung 	X		
Installationsverbot von neuen Ölkesseln	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Keine Änderung 	X		X
Gebäudeenergiegesetzes	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Keine Änderung 	X	X	
BEHG	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Keine Änderung 	X	X	
Modernisierungsumlage	<ul style="list-style-type: none"> ▪ 	X	X	
Nationales Effizienzlabel für Heizungsanlagen	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Keine Änderung 	X		
Innovationsprogramms Zukunft Bau	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Keine Änderung 			X
Serielle Sanierung	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Keine Änderung 			X
Bundeszförderung Effiziente Wärmenetze	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Keine Änderung 	X		
Zusätzliche Instrumente im Szenario				
Förderprogramm Weiterbildungmaßnahmen Wärmepumpe / Qualifikationsoffensive Wärmepumpe	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Neu 			X

Steigerung der Attraktivität des Berufsbildes Handwerk	▪ Neu			X
Verbesserung der Arbeitsbedingungen und Steigerung der Tarifbindung im Handwerk	▪ Neu			
Forschungsförderung Heizungshersteller	▪ Neu			X
Weitere Maßnahmen zur schneller Technologieverfügbarkeit	▪ Neu			X
Gebündelte Ausschreibung von Energieberatungen	▪ Neu	X		X
Änderung des Ausbildungsberufe im SHK Handwerk (Elektrofachkraft)	▪ Neu			
Digitale Plattform und digitalem Gebäudepass um gewerkübergreifend zusammenarbeiten	▪ Neu			

3.1.4 Szenario 3: Transformation zu kostenoptimalen Pfaden mit Fokus auf Nachfrage

Szenario 3 verfolgt als das gleiche Narrativ wie Szenario 1 einer Zielerfüllung mit einem starken technologischen Fokus auf Wärmepumpen und den Ausbau von Wärmenetzen. Das unterstellte Policy Package 2 (PP2) fokussiert dabei jedoch auf die Nachfrageseite. Im Fokus dieses Szenarios stehen Förderprogramme, Unterstützungs- und Entlastungsmaßnahmen, die adressatengerecht ausgestaltet werden. Dazu werden bestehende Maßnahmen auf Bundes- und Kommunalebene evaluiert und ergänzt.

Tabelle 6: Zentrale Instrumente und Wirkdimension entsprechend des Manifold-Ansatzes

Instrumente	Anpassung gegenüber Referenzszenario	Adressierung der Nachfrageseite	Akzeptanz von Politikmaßnahmen	Adressierung des Innovationssystem
Bundeszförderung für effiziente Gebäude (BEG)	▪ Fokus der Förderung auf Wärmepumpen und	X		

	Wärmenetz- anschluss			
Steuerliche Förderung der energetischen Gebäudesanierung	▪ Keine Änderung	X		
Installationsverbot von neuen Ölkesseln	▪ Keine Änderung	X		X
Gebäudeenergiegesetz	▪ 65 % Pflicht EE	X	X	
BEHG	▪ Keine Änderung	X	X	
Modernisierungsumlage	▪ Keine Änderung	X	X	
Nationales Effizienzlabel für Heizungsanlagen	▪ Keine Änderung	X		
Innovationsprogramm Zukunft Bau	▪ Keine Änderung			X
Serielle Sanierung	▪ Keine Änderung			X
Bundesförderung Effiziente Wärmenetze	▪ Keine Änderung	X		
Gesetz für kommunale Wärmeplanung	▪		X	
Aufbauprogramm und Qualifikationsoffensive Wärmepumpe	▪			X
Zusätzliche Instrumente im Szenario				
Verbot von Gas- und Ölheizungsinstallation (65 % Pflicht EE-Wärme) ab 2024	▪ Neu	X		

Szenarienergebnisse für den Gebäudesektor mit den Akteurs- und Diffusionsmodellen
 Ergebnisse der Modellierung

4 Ergebnisse

4.1 Ergebnisse der Modellierung sozio-politischer Akzeptanz

Empirische Erhebungen erfassen eine Momentaufnahme eines bestimmten Phänomens zu einem bestimmten Zeitpunkt und an einem bestimmten Ort, was die breitere Anwendbarkeit der Ergebnisse potenziell einschränkt. In einer Umfrage bildet sich jeder Teilnehmer seine Meinung unabhängig und isoliert. Der Aspekt, dass sich Meinungen verändern können, wenn Individuen mit anderen interagieren oder neuen Informationen ausgesetzt sind, ist nur schwer in Umfragen umsetzbar. Agentenbasierte Modelle bieten jedoch eine leistungsfähige Alternative, um potenzielle Entwicklungen zu untersuchen, die sich aus Interaktionen entwickeln könnten. Durch die Simulation der Interaktionen zwischen einzelnen Agenten in einem dynamischen System ist es möglich, die Auswirkungen unterschiedlicher Bedingungen und Parameter auf das Systemverhalten zu untersuchen. Diese Flexibilität ermöglicht nicht nur die Untersuchung alternativer Szenarien, sondern erleichtert auch die Identifizierung zugrundeliegender Mechanismen und Muster, die in einer einzelnen empirischen Momentaufnahme möglicherweise nicht sofort erkennbar sind. Das PANDORA-Modell wurde speziell entwickelt, um zu erforschen inwiefern sich dynamische Faktoren des Akzeptanzbildungsprozesses abstrahieren und formalisieren lassen. Der Modellansatz basierend auf verfügbaren empirischen Daten und etablierten Modellen der Einstellungsbildung und Meinungsbildungsdynamik (opinion formation). Da das Modell auf vereinfachenden Annahmen beruht, sind alle Schlussfolgerungen vorläufig und bedürfen weiterer Tests und Sensitivitätsanalysen.

Da das Design der empirischen Untersuchung vor der endgültigen Festlegung der Politiksznarien erfolgen konnte, ist die Zuordnungsmöglichkeit zu den Politiksznarien PP1 und PP2 nur eingeschränkt möglich. Tabelle 7 zeigt die Merkmale (Attribute) der politischen Maßnahme, die in der empirischen Studie abgefragt wurden und aus denen die Szenarien im Modell Pandora konstruiert werden können. Weitere Details zur Befragung finden sich im Meilenstein 5-Dokument.

Tabelle 7: Vignetten-Experiment – Mögliche Ausprägungen der politischen Maßnahme

Attribut	Ausprägung pro Vignette	Baseline
Verbote	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Verkauf von neuen Öl- und Gasheizungen mit mittlerer Energieeffizienz ab 2025 ▪ Verkauf von neuen Öl- und Gasheizungen mit schlechter Energieeffizienz ab 2025 ▪ kein Verbot ▪ zusätzliche Austauschpflicht von installierten Anlagen ▪ keine zusätzliche Austauschpflicht von installierten Anlagen 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ kein Verbot des Verkaufs von neuen Öl- und Gasheizungen mit schlechter Energieeffizienz ab 2025 ▪ keine zusätzliche Austauschpflicht von installierten Anlagen
Höhe CO ₂ -Steuer – entstehende Mehrkosten pro Jahr	<ul style="list-style-type: none"> ▪ 150 EUR ▪ 400 EUR ▪ 650 EUR ▪ 900 EUR ▪ 1.150 EUR ▪ 1.400 EUR 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ 150 EUR
Strafzahlungen	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Mittlere bis hohe Strafzahlungen ▪ niedrige bis mittlere Strafzahlungen ▪ keine Strafzahlungen 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ keine Strafzahlungen

Attribut	Ausprägung pro Vignette	Baseline
Mittelverwendung	<ul style="list-style-type: none"> ○ für entweder Herstellende ○ oder Installateur*in 	
	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Entlastung für einkommensschwache Haushalte ▪ Entlastung für Mietende ▪ Entlastung für Familien mit Kindern ▪ Ausgaben für Forschung & Entwicklung ▪ Kaufprämie für erneuerbare Heizsysteme ▪ keine Regelung 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ keine Regelung

Die Attribute aus dem Vignetten-Experiment werden den Politik-Szenarien wie folgt zugeordnet:

Tabelle 8: Zuordnung der Politikmaßnahmen Attribute zu den Politiksznarien

Szenario	Technologieoffenheit	Transformation zu kostenoptimalen Pfad Policy-Package 1	Transformation zu kostenoptimalen Pfad Policy-Package 2
Beschreibung	Technologieoffene Adressierung mit der Hypothese, dass Technologien, die heute fossile Energieträger nutzen, später dekarbonisiert werden können.	Fokus insbesondere auf Wärmepumpen und Wärmenetze. Starke Förderung von Innovationssystemen	Fokus insbesondere auf Wärmepumpen und Wärmenetze Starke Förderung von Nachfrageseite
Kombinierte Attribute der politischen Maßnahme	Entsprechen der Baseline	Entsprechen der Baseline außer: <ul style="list-style-type: none"> ▪ Höhe CO2-Steuer: 1500 EUR entstehende Mehrkosten pro Jahr ▪ Mittelverwendung: Ausgaben für Forschung & Entwicklung ▪ Mittlere bis hohe Strafzahlungen für Herstellende und Installateur*Innen 	Entsprechen der Baseline außer: <ul style="list-style-type: none"> ▪ Verkauf von neuen Öl- und Gasheizungen mit mittlerer bis schlechter Energieeffizienz ab 2025 ▪ Zusätzliche Austauschpflicht von installierten Anlagen ▪ Mittlere bis hohe Strafzahlungen für entweder Herstellende oder Installateur*Innen

In PANDORA sind die gesellschaftlichen Akteure über ein Diskurs-Netzwerk miteinander verbunden. Für die Ergebnisse des Modelllaufs ist die Konfiguration des von entscheidender Bedeutung.

Hierfür wurde ein heterogenes Watts-Strogatz Netzwerk gewählt. Für die exemplarischen Ergebnisse wird eine Netzwerkkonfiguration gewählt, die auf den Ergebnissen von Holzauer (2017) basiert. Weitere Informationen zur Initialisierung des Modells befinden sich im Anhang. Die Anzahl der nächsten Nachbarn wird auf $k = 6$ gesetzt, die Wahrscheinlichkeit einer Verknüpfung aufgrund der sozio-demographischen Ähnlichkeit (Homophilie) auf $p = 0,05$ und der Homophilie Faktor auf $\alpha = 5$. Das Modell generiert ein Netzwerk, dass stark geclustert ist und dazu neigt, eng verbundene Gruppen zu bilden.

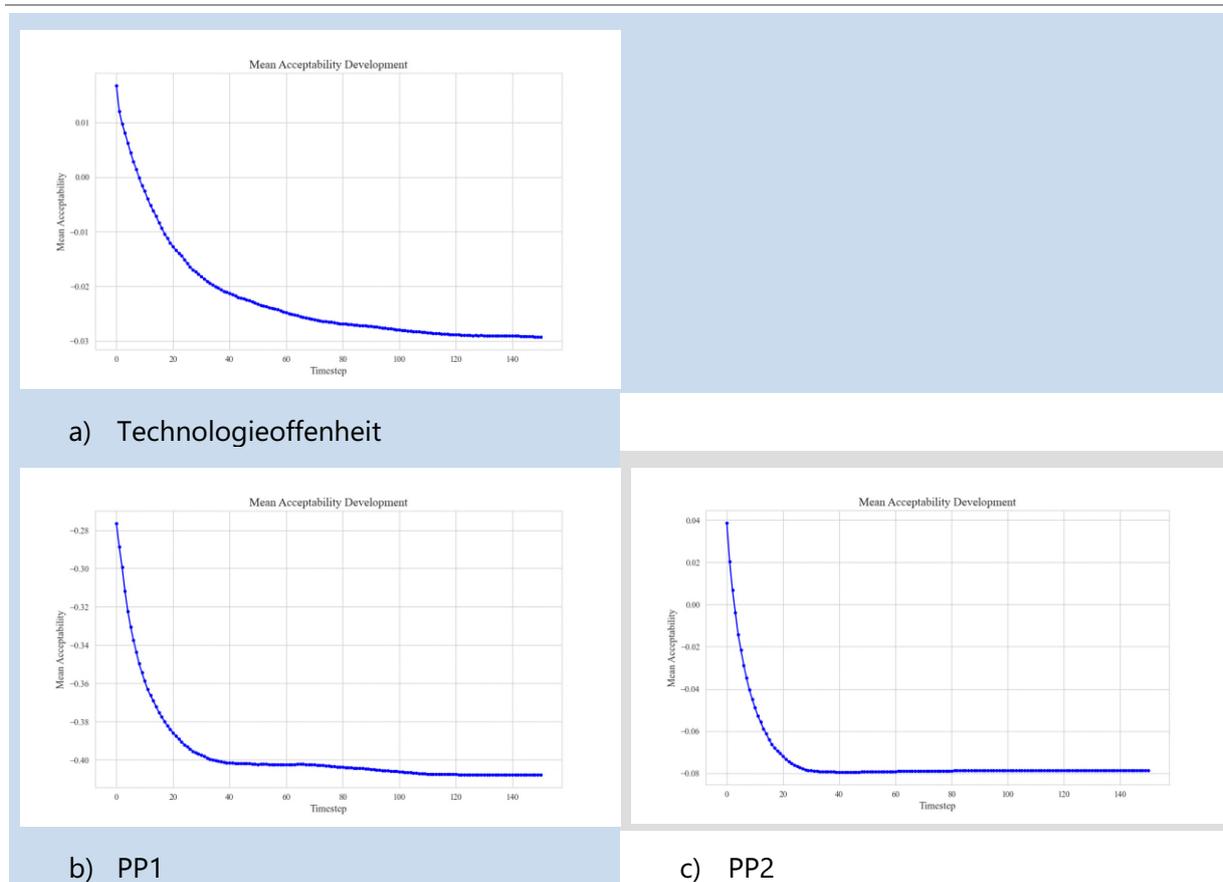
Die weitere Grundlage für die Initialisierung des Modells dienen die Ergebnisse des Clustering aus der Latent Class Analyse (Siehe Meilenstein 5-Dokument). Auf der Grundlage der Antworten der empirischen Erhebung konnten fünf voneinander unterscheidbare Klassen identifiziert werden. Im Folgenden werden exemplarische Ergebnisse der Modellläufe für eine Anzahl von 800 Agenten und 150 Ticks (Interaktionsschritte) dargestellt. Diese Anzahl reicht aus, um stabile Ergebnisse über die Population zu erhalten und Tendenzen zu erkennen und eine übersichtliche Analyse durchzuführen. Das Modell geht davon aus, dass Akzeptanz ein kontinuierlicher Wert zwischen -1 und 1 ist.

4.1.1 Szenarienvergleich

Entwicklung der Akzeptanz der gesamten Population

Das Niveau der Akzeptanz der politischen Maßnahmen ist in den drei ausgewählten Szenarien sehr unterschiedlich. Abbildung 6 zeigt die durchschnittliche Entwicklung der Akzeptanz für den Modelllauf.

Abbildung 6: Entwicklung der Akzeptanz in der Gesamtpopulation in den drei Szenarien

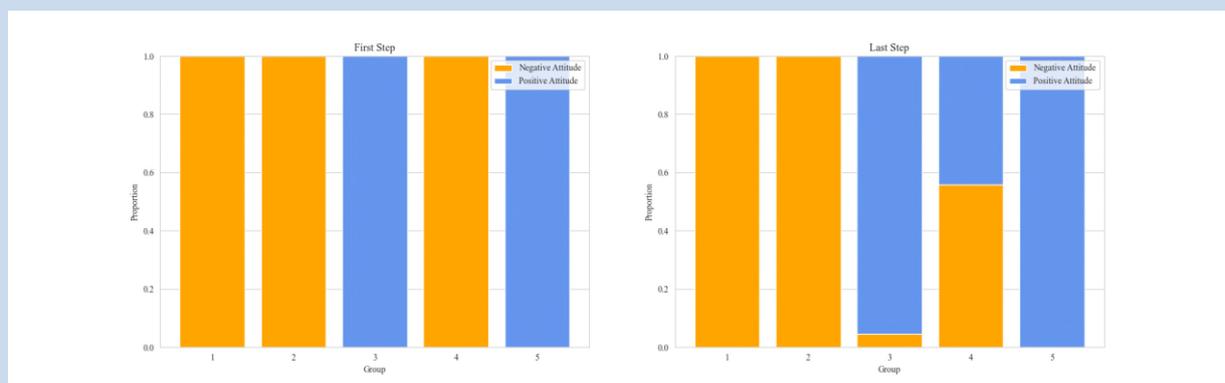


Beim Vergleich der Szenarien fällt auf, dass alle ein ähnliches Muster aufweisen: ein steiler Abfall der mittleren Akzeptanz zu Beginn der Simulation, gefolgt von einer Stabilisierung auf einem neuen Niveau. Der Hauptunterschied liegt im Niveau, auf dem sich die mittlere Akzeptanz einpendelt. Während das Szenario (a) ein Niveau um Null beibehält, stabilisieren sich die Szenarien pp1 (a) und pp2 (b) auf zunehmend negativen Niveaus. PP1 hat bereits zu Beginn der Simulation die geringste Akzeptanz. Die Netzwerkeffekte und die Interaktion der Agenten führen also zu einer noch stärkeren Verschiebung in den negativen Bereich. Im nächsten Schritt ist es aber auch interessant, die Unterschiede zwischen den Gruppen zu betrachten.

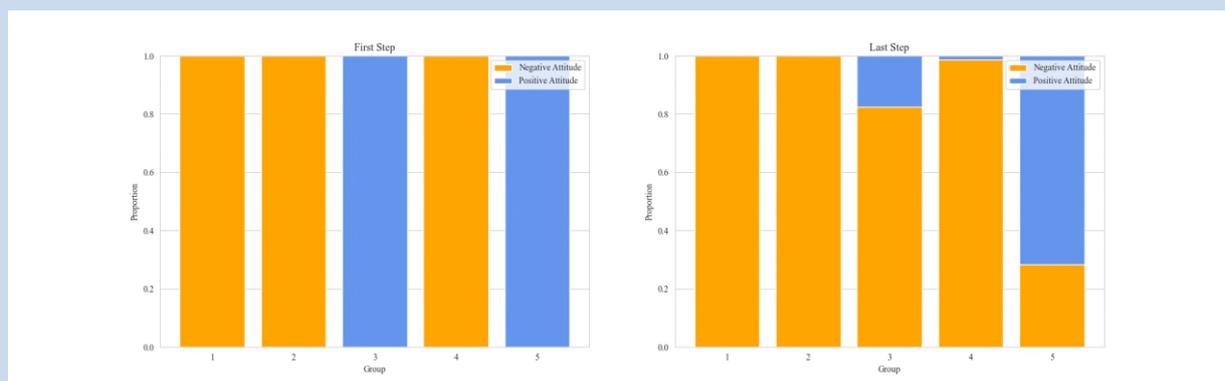
Unterscheidung nach Gruppen

Abbildung X zeigt für jedes der drei Szenarien den Anteil der positiven und negativen Einstellungen gegenüber der Politikmaßnahme im Vergleich zwischen der Situation vor und nach der Modellierung.

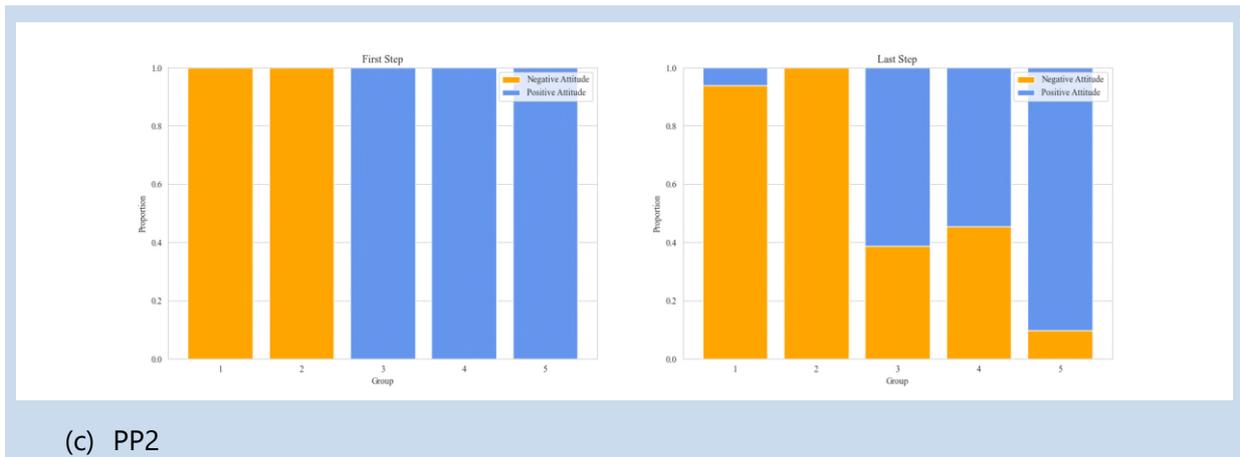
Abbildung 7: Anteil der positiven und negativen Einstellung pro Gruppe in den drei Szenarien



(a) Technologieoffenheit



(b) PP1



Vor der Simulation liegt die Akzeptanz der Klassen 3 und 5 in den Szenarien (a) und (b) und in Szenario (c) auch der Klasse 4 im positiven Bereich. Nach dem Modelllauf ist eine Verschiebung der Akzeptanz innerhalb der Gruppen erkennbar. In Szenario (a) bewirken die Netzwerkeffekte eine Verschiebung in den positiven Bereich. In Szenario (b) werden die Agenten der Klassen 3 und 5 beeinflusst, so dass Anteile der Gruppe in den negativen Bereich rutschen. In Szenario (c) sind es die Klassen 2 und 4, die die größte Akzeptanzverschiebung vom positiven in den negativen Bereich erfahren. Eine Verschiebung in den positiven Akzeptanzbereich ist jedoch bei Klasse 1 zu beobachten, jedoch ist der Anteil sehr gering. Eine detailliertere Aufschlüsselung liefert die Abbildung 7. Die Dichtegrafiken (kde plots) zeigen wie Politikakzeptanz, und die Wahrnehmungsvariablen (Effektivität, Belastung, Fairness) in den betrachteten Gruppen von dem initialen Wert zu Beginn der Simulation abweichen und geben Einblicke in die Verteilung und Varianz innerhalb dieser Maße. Die Analyse der der Entwicklung Akzeptanz und die Wahrnehmungsvariablen (Effektivität, Fairness, Belastung) durch die Simulation der Interaktionsprozesse für die fünf Gruppen hat unterschiedliche Muster ergeben, die im Folgenden für die drei Szenarien vorgestellt.

Technologieoffenheit

Abbildung 8: Szenario Technologieoffenheit: Änderung der Akzeptanz zwischen von ursprünglichem Wert (Tick 0) und nach Modelllauf (Tick 150) für die Agenten nach Klassenzugehörigkeit

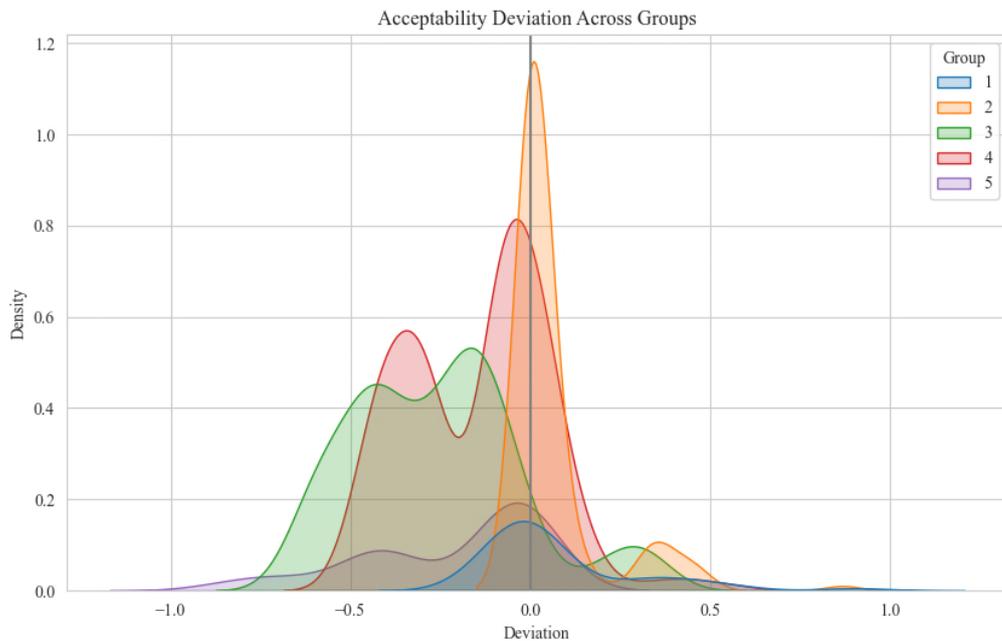
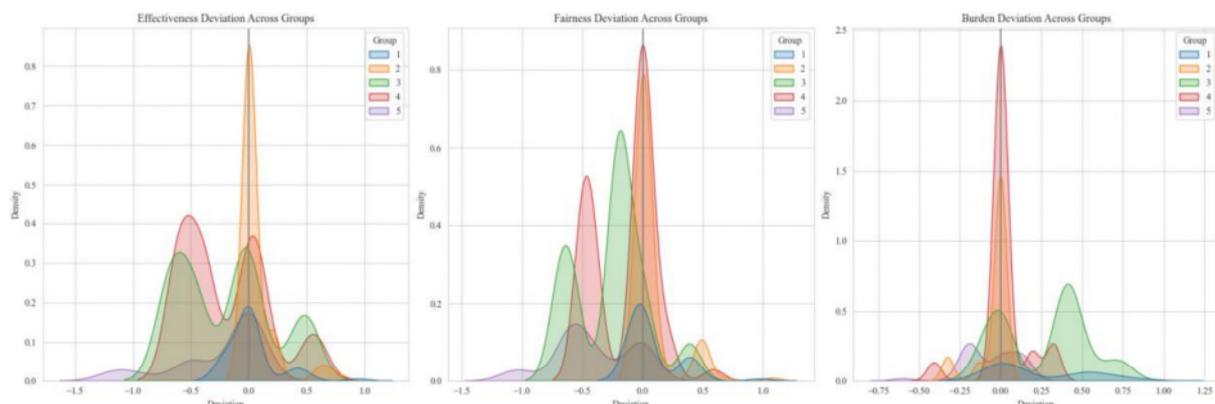


Abbildung 8 zeigt die Änderung der Akzeptanz im Szenario Technologieoffenheit. Gruppe 2 zeichnet sich durch eine geringe Streuung um den Ausgangswert aus. Die Agenten dieser Gruppe neigen nicht dazu, ihre Einstellung gegenüber der politischen Maßnahme zu ändern. Im Gegensatz dazu weist Gruppe 5 die höchste Variabilität in der Akzeptanz auf. Die Gruppen 1, 3 und 4 weisen ein unterschiedliches Maß an Konsistenz und Abweichung vom Ausgangswert auf. Bereits für das technologieoffene Szenario (das im PANDORA-Modell eine Art Politik-Baseline darstellt) zeigt sich für alle Gruppen außer Gruppe 2 die Tendenz, dass die Akzeptanz der Politik negativ beeinflusst wird.

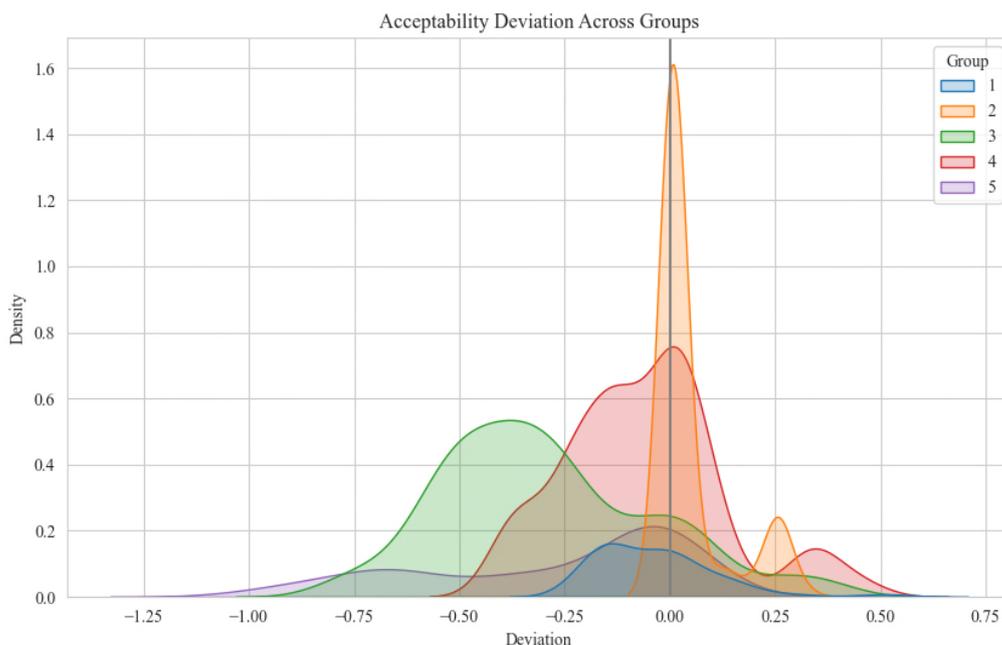
Abbildung 9: Szenario Technologieoffenheit: Änderung der Einstellung zu Effektivität, Fairness und Belastung der Politikmaßnahme zwischen von ursprünglichem Wert (Tick 0) und nach Modelllauf (Tick 150) für die Agenten nach Klassenzugehörigkeit



Die Entwicklung der Wahrnehmungsvariablen im technologieoffenen Szenario ist in Abbildung 9 dargestellt. Bei Gruppe 1 ist eine leichte Tendenz zur negativen Abweichung bei der Effektivität zu beobachten, obwohl die Fairness-Abweichung gleichmäßig um den Initialwert herum verteilt ist und die Änderung bezüglich der persönlichen Belastung minimal ist. Gruppe 2 sticht mit ihrem Spitzenwert bei der Effektivität, Fairness und Belastung um den Initialwert hervor. Im Gegensatz dazu weist Gruppe 3 eine aus positiven und negativen Effektivität-Abweichungen, eine negative Tendenz bei Fairness und eine große Streuung hinsichtlich der Belastung auf. Gruppe 4 zeichnet sich durch negative Abweichungen sowohl bei Effektivität als auch bei Fairness aus. Gruppe 3 und 4 sind sich hier in der Bildung der Spitzen Ähnlich. Auch sieht man eine starke Polarisierung zwischen einem Cluster, welches die Meinung nicht ändert und ein Cluster, welches sich ins Negative verschiebt. Bezüglich der Belastung, deckt sich die Gruppe mit dem Verhalten von Gruppe 2. Gruppe 5 zeigt bei der Bewertung der drei Wahrnehmungsvariablen eine hohe Streuung.

Szenario PP1

Abbildung 10: Szenario PP1: Änderung der Akzeptanz zwischen von ursprünglichem Wert (Tick 0) und nach Modelllauf (Tick 150) für die Agenten nach Klassenzugehörigkeit

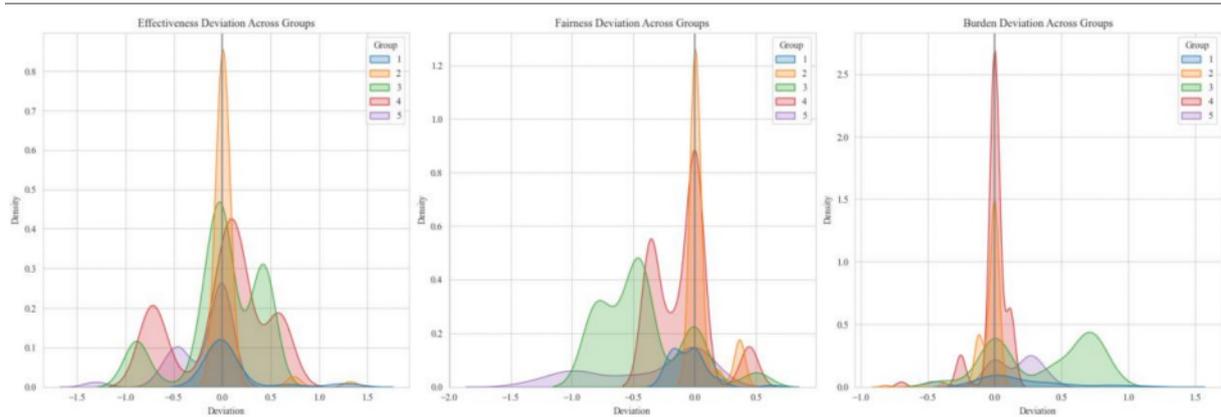


Die Kurve der Gruppe 1 mit ihrem mäßigen Gipfel leicht links von der Mitte zeigt eine subtile, aber stetige negative Abweichung von dem, was als akzeptabel angesehen wird. Gruppe 2 steht im krassen Gegensatz dazu, mit einer scharfen Spitze an der Nulllinie, was auf einen konzentrierten Konsens über die Akzeptanz hinweist, der genau der erwarteten Norm entspricht. In Gruppe 3 ist die Verteilung nicht so stark konzentriert wie in Gruppe 2, aber immer noch mit einer Tendenz zur negativen Abweichung, wenn auch weniger gleichmäßig. Die breitere Streuung in Gruppe 4, ähnlich wie in Gruppe 1, aber mit einer stärkeren negativen Tendenz, deutet auf eine größere Uneinigkeit darüber hin, was in dieser Gruppe akzeptabel ist. Gruppe 5 schließlich zeigt ein deutlich anderes Muster mit einer abgeflachten Kurve, die sich über den gesamten Abweichungsbereich erstreckt. Diese Form deutet auf ein vielfältiges Meinungsspektrum bezüglich der Akzeptanz hin, ohne eine klare zentrale Tendenz, wie sie in den anderen Gruppen zu erkennen ist. Es bilden sich weniger

deutliche Spitzen und Cluster heraus im Vergleich zum Szenario Technologieoffenheit, was darauf hindeutet, dass die Gruppen in der Gesamtbeurteilung viel homogener sind.

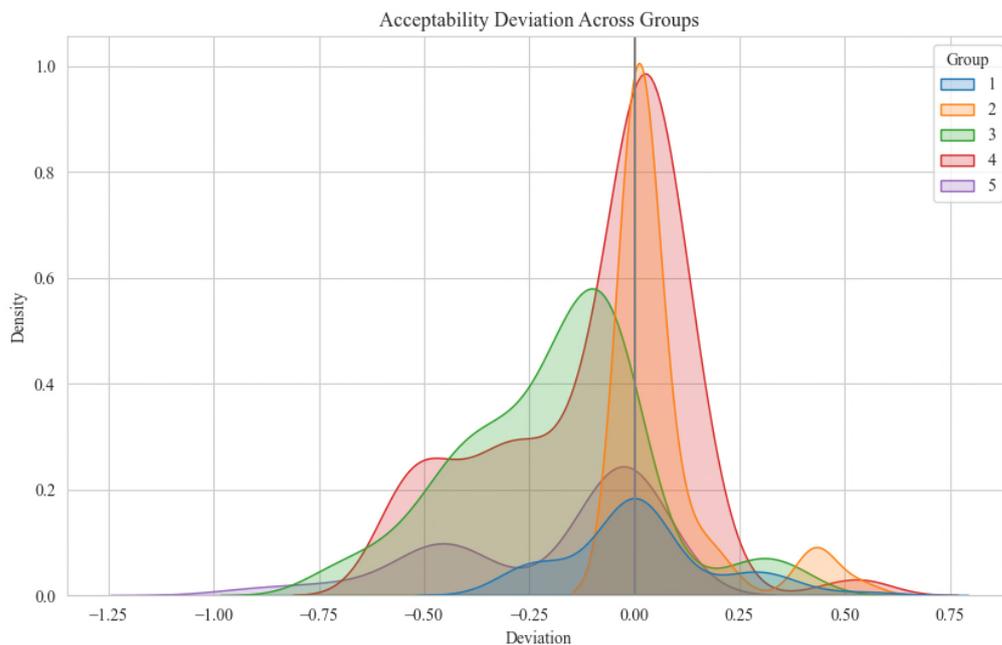
Szenario PP2

Abbildung 11: Szenario PP1: Änderung der Einstellung zu Effektivität, Fairness und Belastung der Politikmaßnahme zwischen von ursprünglichem Wert (Tick 0) und nach Modellauf (Tick 150) für die Agenten nach Klassenzugehörigkeit



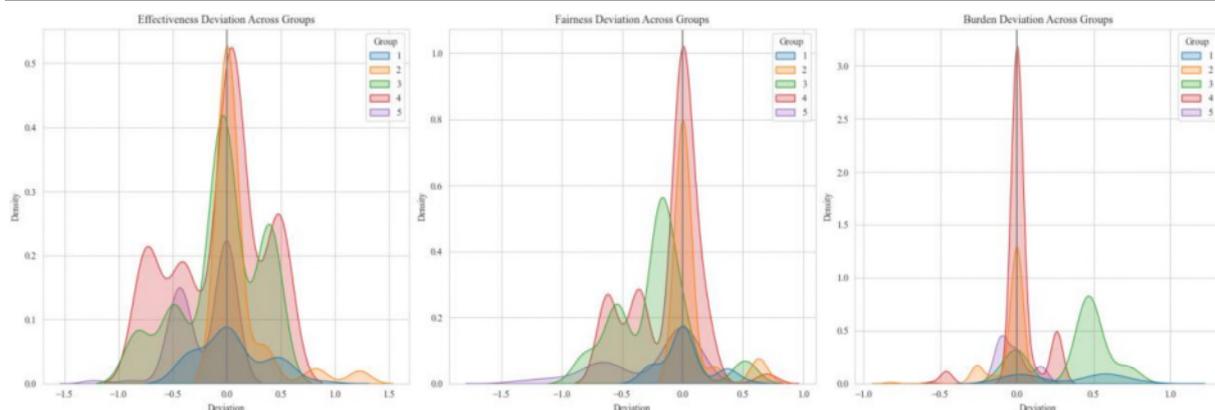
Die Streuung von Gruppe 1 ist gering für Effektivität und Fairness, aber dafür sehr hoch bezüglich der Belastung. Gruppe 2 zeigt eine hohe Spitze für alle Wahrnehmungsvariablen, mit einer minimalen Abweichung in den positiven Bereich. Die Effektivität der Gruppe 3 zeigt Cluster die sich im positiven und negativen Bereich ausbilden, eine negative Schiefe in der Wahrnehmung der Fairness und eine Verschiebung der Variablen Belastung nach rechts. Die Tendenzen von für Gruppe 4 ähneln für Effektivität und Fairness denen der Gruppe 3, allerdings mit einer stärkeren Verschiebung ins Negative. Gruppe 5 schließlich zeigt eine leicht positive Abweichung bei der Effektivität und die größte Streuung bei der Fairness.

Abbildung 12: Szenario PP2: Änderung der Akzeptanz zwischen von ursprünglichem Wert (Tick 0) und nach Modelllauf (Tick 150) für die Agenten nach Klassenzugehörigkeit



Gruppe 1 hat einen moderaten Spitzenwert um Null was auf eine gemeinsame negative Abweichung von der Norm bei der Akzeptanz hinweist. Auch Gruppe 2 hat eine Spitze bei Null übereinstimmend mit Gruppe 4, zeigt aber auch in der Streuung eine positive Tendenz. Die Verteilung der Gruppe 3 ist breiter mit einer Spitze im positiven Bereich, was auf eine leichte negative Abweichung bei der Akzeptanz hindeutet. Gruppe 4 hat eine Abweichung der Akzeptanz in den negativen Bereich. Gruppe 5 schließlich zeigt eine sehr flache Verteilung was auf eine unterschiedliche Wahrnehmung der Akzeptanz ohne eine einzige gemeinsame Abweichung hindeutet.

Abbildung 13: Szenario PP2: Änderung der Einstellung zu Effektivität, Fairness und Belastung der Politikmaßnahme zwischen von ursprünglichem Wert (Tick 0) und nach Modelllauf (Tick 150) für die Agenten nach Klassenzugehörigkeit



Die Darstellung der Effektivität zeigt eine sehr starke Variabilität innerhalb der Gruppen. Wenig Variabilität besteht dagegen bei der Beurteilung der Belastung. Gruppe 2 und 4 haben eine starke Spitze bei null für alle Wahrnehmungsvariablen. Gruppe 5 hingegen zeigt die größte Bandbreite

Die Dichtegrafiken (kde plots) zeigen wie Politikakzeptanz in den betrachteten Gruppen von dem initialen Wert zu Beginn der Simulation abweichen und geben Einblicke in die Verteilung und Varianz. Die Analyse der der Entwicklung Akzeptanz durch die Simulation der Interaktionsprozesse für die fünf Gruppen hat für die verschiedenen Szenarien unterschiedliche Muster ergeben.

Eine auffällige Spitze bei Null in den Meinungsverteilungen deutet darauf hin, dass die Agenten in den Gruppen ihre Meinung nach dem Simulationslauf nur wenig veränderten. Dies kann zwei Ursachen haben: Zum einen könnte es an dem hohen Anteil von "Extremisten" in der Gruppe liegen, die sich von ihrem Umfeld nicht oder nur schwer beeinflussen lassen. Zum anderen könnte es daran liegen, dass sich die einzelnen Agenten in einem homogenen Netzwerk befinden, in dem sie überwiegend von Nachbarn mit ähnlichen Einstellungen umgeben sind. Beide Faktoren - die Unbeeinflussbarkeit der Extremisten und die Homogenität der Netzwerke - spielen eine entscheidende Rolle dabei, ob und wie sich Meinungen im Zuge politischer Entwicklungen verändern oder stabil bleiben.

Bei der Analyse der Politiksznarien fällt die Klasse 2 durch eine besonders negative Einstellung auf, sie nimmt in allen untersuchten Politiksznarien eine ablehnende Position ein. Im Gegensatz dazu zeigt Gruppe 5 durchgängig eine positive Einstellung. Jedoch ist es auch diese Gruppe, deren Beurteilung der Politikmaßnahme in allen drei Szenarien am stärksten streut, d.h. sich leicht beeinflussen lässt. Gruppe 1 hat in allen Szenarien ein auffällig unterschiedliches Verhalten. Diese Gruppe ist auch diejenige mit dem höchsten Anteil an Haus- bzw. Wohnungseigentümern, die von den Maßnahmen am stärksten beeinflusst werden. Interessant ist auch, dass die Gruppen 3 und 4 stark von ihren Netzwerken beeinflusst werden und die Agenten dieser Gruppen ihre Meinung stark vom Initialwert verändern. Da sie auch den größten Anteil der Bevölkerung ausmachen, haben sie einen großen Einfluss auf die Veränderung der Gesamtakzeptanz in der Bevölkerung. Betrachtet man Unterschiede in den Szenarien zeigt insbesondere PP1, dass die Gruppen in ihrer Einstellung homogen verbleiben und verschieben, während sich im Szenario Technologieoffenheit und PP2 eher Cluster um einen neuen Akzeptanzwert Wert herausbilden.

4.1.2 Diskussion

Die vorläufigen Modellergebnisse zeigen, wie die Struktur des sozialen Netzwerks und der soziale Einfluss die anfängliche Akzeptanz der Politik beeinflussen können. Das Modell ermöglicht das Testen verschiedener politischer Szenarien. Die Analyse könnte zu Empfehlungen für die Politikgestaltung führen, die die Perspektiven verschiedener sozialer Gruppen berücksichtigen.

Die Variation der Politiksznarien im Vergleich zur Basislinie führt zu unterschiedlichen Bewertungen für die Akteursgruppen. Erwartungsgemäß führt der Ansatz der begrenzten Rationalität des RA-Modells zu einer Konvergenz der Attribute der Politikwahrnehmung. Dies wiederum führt zu Veränderungen in der Bewertung der Akzeptanz der Politik.

Die Netzwerkstruktur ist ein wichtiger Faktor der sich auf den Prozess der Einstellungsbildung auswirkt, da sie den Agenten die Möglichkeit gibt, mit Mitgliedern anderer Gruppen zu interagieren, die andere Wahrnehmungen der Politik haben. Die Meinungen über Belastung, Fairness und Wirksamkeit orientieren sich eher an den Werten der Mehrheitsmeinung, die wiederum von der Gruppe mit dem höchsten Anteil in der Population beeinflusst wird. Die Dynamik innerhalb einer Gruppe hängt jedoch auch stark von dem Anteil der "Extremisten" in jeder Gruppe ab, die die Meinungsbildung beeinflussen. Die Auswirkungen der Attribute der Politikwahrnehmung sind in der daraus resultierenden Akzeptanz der Politik sichtbar. Der endgültige Wert wird angepasst, je nachdem, welches Attribut der Politikwahrnehmung von einer Gruppe bevorzugt wird. Die

Ergebnisse zeigen auch, dass die Kommunikation innerhalb des Netzwerks den Meinungsraum für jede Gruppe vergrößert.

Zum gegenwärtigen Zeitpunkt hat das Modell jedoch mehrere Einschränkungen. Erstens werden die Meinungen bei begrenzter Zuversicht mathematisch gemittelt. Das bedeutet, dass eine Bevölkerung mit einer hohen Toleranz für eine politische Maßnahme zu Konformität führen würde, während die Ergebnisse für eine Bevölkerung mit einer niedrigen Toleranz eine Polarisierung zeigen würden.

Zweitens kann das Modell des begrenzten Vertrauens zwar veranschaulichen, wie unterschiedliche Meinungen zu einem gewissen Grad an Übereinstimmung konvergieren können, es erfasst jedoch möglicherweise nicht genau die Dynamik des Fortbestehens extremer Meinungen innerhalb einer Population. In realen Situationen lassen sich extreme Meinungen nicht ohne weiteres durch Interaktionen abmildern, und die Polarisierung kann über längere Zeit bestehen bleiben. Daher sollte diese Einschränkung des Deffuant-Modells berücksichtigt werden, da es die Komplexität der Meinungsbildung möglicherweise nicht vollständig wiedergibt. Drittens bedeutet das Fehlen kontextbezogener Überlegungen, dass wichtige soziale Dynamiken und der zugrunde liegende Kontext, die die Kommunikationsmuster bestimmen, möglicherweise übersehen werden. In zukünftigen Versionen von PANDORA planen wir, das Modell zu erweitern, um die Medien als wichtige Instanz einzubeziehen, die die Übertragung von politischen Maßnahmen auf einzelne Akteure beeinflusst. Da der Einzelne in der Regel politische Informationen erhält, die bereits vorformuliert sind, einschließlich der Voreingenommenheit der Medien, ist es wichtig, die Auswirkungen der Medien auf die subjektive Wahrnehmung der Politik zu berücksichtigen. Diese Erweiterung wird es uns ermöglichen, besser zu verstehen, wie die Medien die Einstellung zur Politik beeinflussen, den gegenseitigen Einfluss der öffentlichen Meinung und der Medien zu untersuchen und zu erforschen, wie institutionelle Akteure indirekt bei der Gestaltung der Politik im öffentlichen Diskurs konkurrieren. Ein weiterer wichtiger Bereich für die Modellentwicklung ist die Kopplung mit einem techno-ökonomischen Modell des Gebäudebestands.

4.2 Ergebnisse der Technologiegenese- und Lernkurvenmodellierung

4.2.1 Simulationsansatz

Nach der Festlegung der verschiedenen Politikszenerien und der damit verbundenen Modellkalibrierung (siehe MS6) wurde jedes Szenario mehrfach durchgespielt ($n = 10$)³. Jeder Lauf bestand aus 371 Ticks, wobei jeder Tick einen einzelnen Monat für den Zeitraum Januar 2020 bis Dezember 2040 darstellt. Alle Daten, die sich auf die untersuchten Modellobjekte und Verfahren beziehen, wurden exportiert und anschließend ausgewertet.

Die Analysen mit dem Modell fokussieren auf die zuvor herausgearbeiteten wesentlichen Aspekte: die Auswirkungen von (1) Lernkurven der technologischen Entwicklung und (2) Installateurpopulation und -portfolios auf die Verbreitung verschiedener Heiztechnologien innerhalb von Innovationssystemen. Die folgenden Schlüsseldimensionen wurden entsprechend innerhalb von SLICK analysiert: (1) Politische Maßnahmen, (2) Technologieentwicklung und (3) Installateurpopulation.

³ Nach Prüfung der vorläufigen Ergebnisse wurde die Anzahl der gewählten Iterationen als angemessen bewertet.

4.2.2 Politische Maßnahmen

Für die Analysen der politischen Maßnahmen innerhalb der definierten Szenarien wurden die für das Modell relevanten Elemente simuliert und hinsichtlich des potenziellen Einflusses auf die Diffusion der Heiztechnik bewertet. Die folgenden Aspekte wurden berücksichtigt:

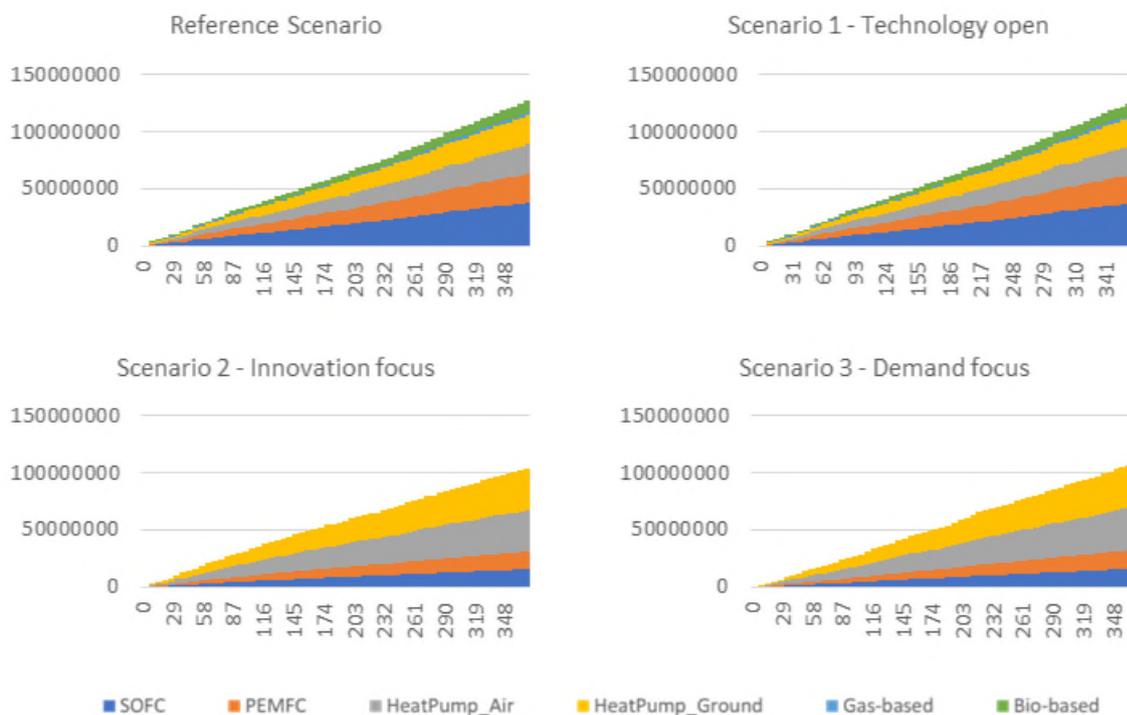
- Öffentliche F&E
- Marktanreize
- Zusätzliche Finanzierung der Wärmepumpentechnologie
- Training von Installateuren
- Ausbildung von Installateuren

Im Folgenden werden jeweils die Verläufe der verschiedenen Maßnahmen über den Simulationszeitraum hinweg dargestellt.

Öffentliche Forschung und Entwicklung (FuE)

Öffentliche FuE betrifft Investitionen, die durch die öffentliche Politik in die Finanzierung von FuE-Projekten getätigt werden. Sie zielen auf FuE-Projekte, die sich auf die Verbesserung einer bestimmten Heiztechnologie konzentrieren (Abbildung 1).

Abbildung 1 Öffentliche FuE-Ausgaben für Projekte, die sich auf bestimmte Heiztechnologien konzentrieren. X-Achse: Zeitschritte; Y-Achse: Kumulierter Betrag der Investitionen (EURO)



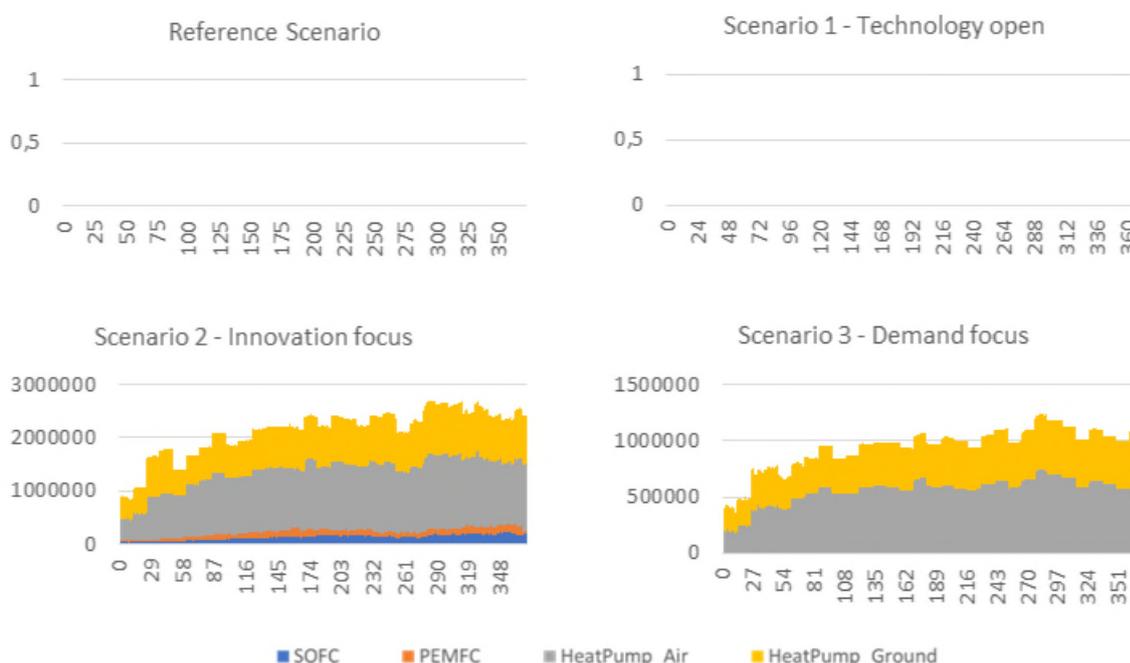
Die wichtigsten Annahmen hierbei sind:

- Während sich das Referenzszenario und Szenario 1 auf alle Technologien konzentrieren, haben Szenario 2 und Szenario 3 einen stärkeren Fokus auf erneuerbare Technologien, wobei keine Investitionen in gasbasierte und biobasierte Technologien getätigt werden.
- Die Verteilung der Investitionen ist über den gesamten simulierten Zeitraum gleich; auch die relative Verteilung der Investitionen in die einzelnen Technologien bleibt über den gesamten simulierten Zeitraum ähnlich.

Marktanreize

Bei Marktanreizen handelt es sich um eine Subventionierung des Gesamtpreises eines heiztechnischen Produkts. Heiztechnologien, die im Mittelpunkt von Förderprogrammen stehen, können daher billiger verkauft werden, was sich indirekt auf die Nachfrage nach solchen Produkten auswirken kann (Abbildung 2). Anreizsysteme können auf bestimmte Produkte für bestimmte Zeiträume ausgerichtet sein.

Abbildung 2 Gesamtbetrag der Marktanreize, den die Technologiehersteller auf der Grundlage der verkauften Einheiten erhalten haben. X-Achse: Zeitschritte; Y-Achse: Gesamtbetrag der Investition (€)



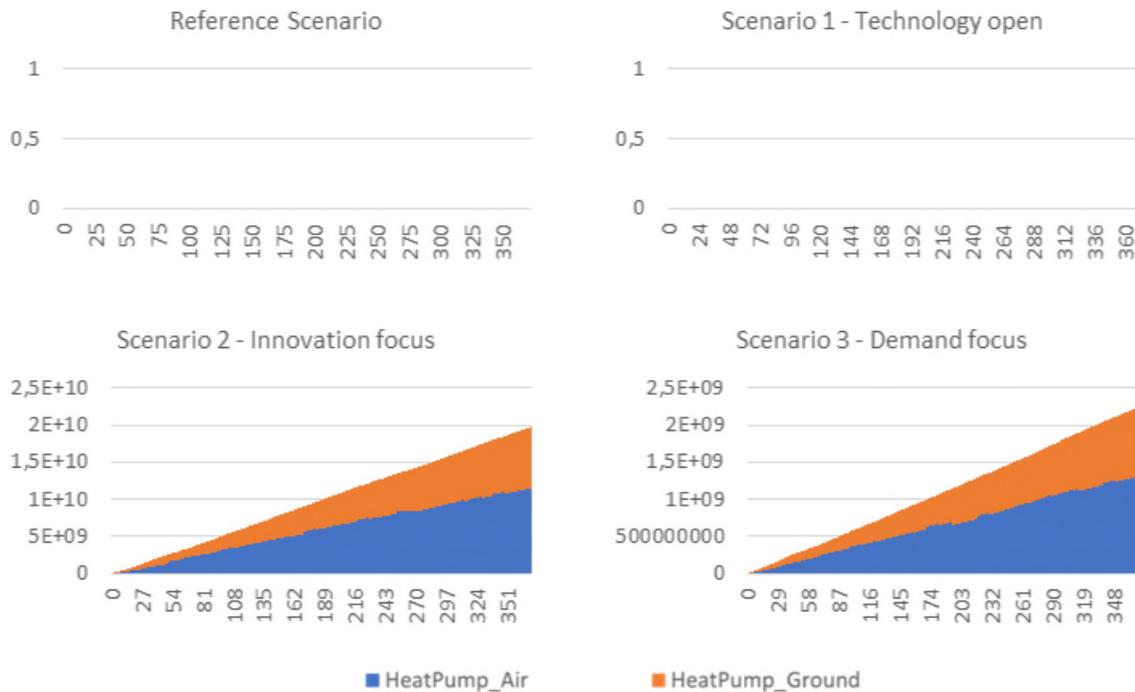
Die wichtigsten Annahmen hierbei sind:

- Für das Referenzszenario und Szenario 1 wird davon ausgegangen, dass es keine spezifischen Subventionsregelungen gibt und somit auch keine öffentlichen Investitionen getätigt werden. Dies steht im Einklang mit dem Prinzip freier Märkte.
- Für die Szenarien 2 und 3 gibt es Subventionssysteme für verschiedene Technologien. In Szenario 2 werden sowohl die Wärmepumpen- als auch die Brennstoffzellentechnologie subventioniert, in Szenario 3 nur die Wärmepumpentechnologie.

Zusätzliche Förderung der Wärmepumpentechnologie

Zusätzlich zu den Fördersystemen mit Wirkung auf Forschung und Marktpreise werden die Auswirkungen einer speziellen Förderung modelliert, die sich auf die Wärmepumpentechnologie konzentriert und direkte finanzielle Auswirkungen auf die Hersteller hat (Abbildung 3). Im Rahmen dieses Fördersystems erhalten die Hersteller einer bestimmten Wärmepumpentechnologie eine zusätzliche finanzielle Unterstützung, die sich nach der Menge der verkauften Einheiten richtet. Diese Mittel erhöhen das Kapital des Unternehmens, das dann für Investitionen in verschiedene Aspekte wie die Organisationsstruktur oder die interne Forschung und Entwicklung verwendet werden kann.

Abbildung 3 Geschätzte zusätzliche finanzielle Unterstützung der Hersteller von Wärmepumpentechnologie. X-Achse: Zeitschritte; Y-Achse: Kumulierte Investitionssumme (€)



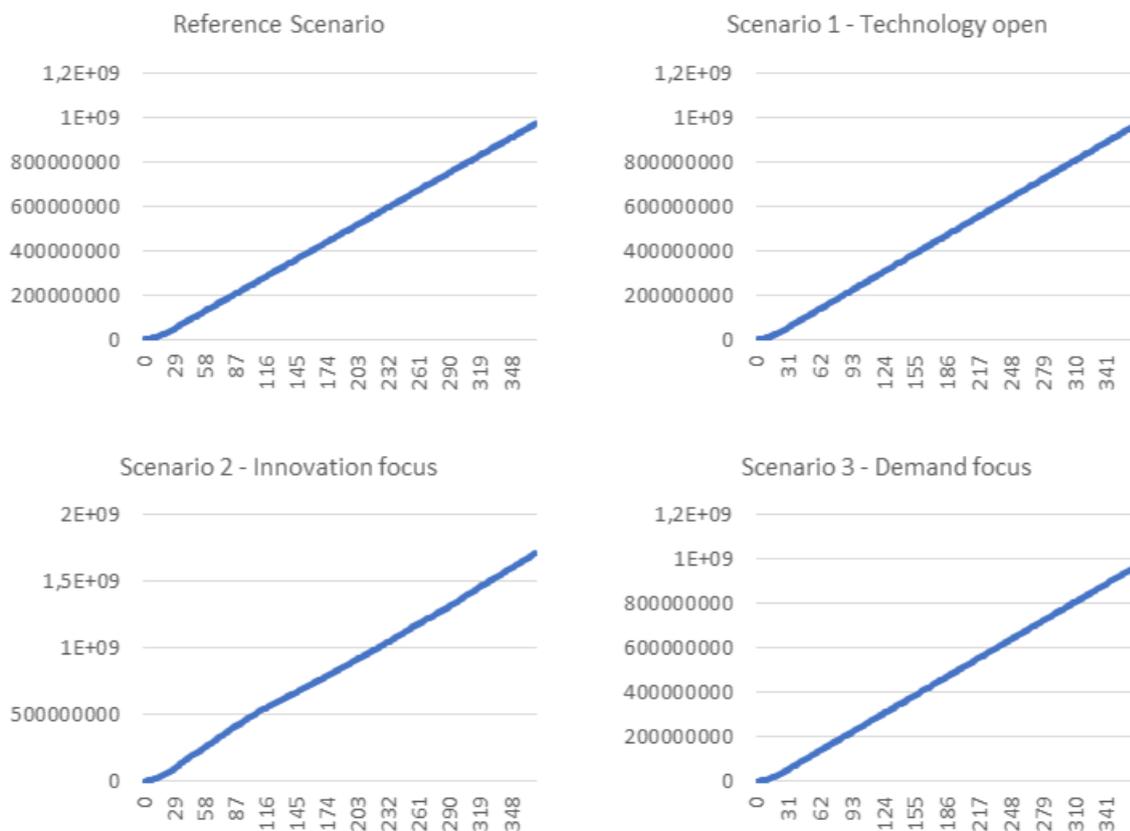
Die wichtigsten Annahmen hierbei sind:

- Für das Referenzszenario und das Szenario 1 wird davon ausgegangen, dass es kein zusätzliches Fördersystem für die Wärmepumpentechnologie gibt und somit keine öffentlichen Investitionen in diesem Bereich getätigt werden. Dies entspricht dem Prinzip des freien Marktes.
- Für die Szenarien 2 und 3 gibt es das oben beschriebene System zur Förderung der Wärmepumpentechnologie. Obwohl das Fördersystem in beiden Szenarien während des gesamten simulierten Zeitraums aktiv ist, ist der Umfang der zusätzlichen Förderung in Szenario 2 größer als in Szenario 3.

Ausbildung der Installateure

Die Ausbildung von Installateuren betrifft die Investitionen, die von der öffentlichen Hand im Ausbildungssystem getätigt werden (Abbildung 4). Diese Förderung bestimmt im Wesentlichen die Kapazität des Bildungssystems in Bezug auf die maximale Anzahl potenzieller Studenten. Da die Einschreibung einzelner Studenten vom Staat mit einem festen Betrag unterstützt wird, führt eine größere Kapazität und mehr Einschreibungen zu einer höheren Investition des Staates in das Bildungssystem.

Abbildung 4 Investitionen der öffentlichen Hand in das Ausbildungssystem für Installateure. X-Achse: Zeitschritte; Y-Achse: Kumulierter Betrag der Investitionen (EURO)



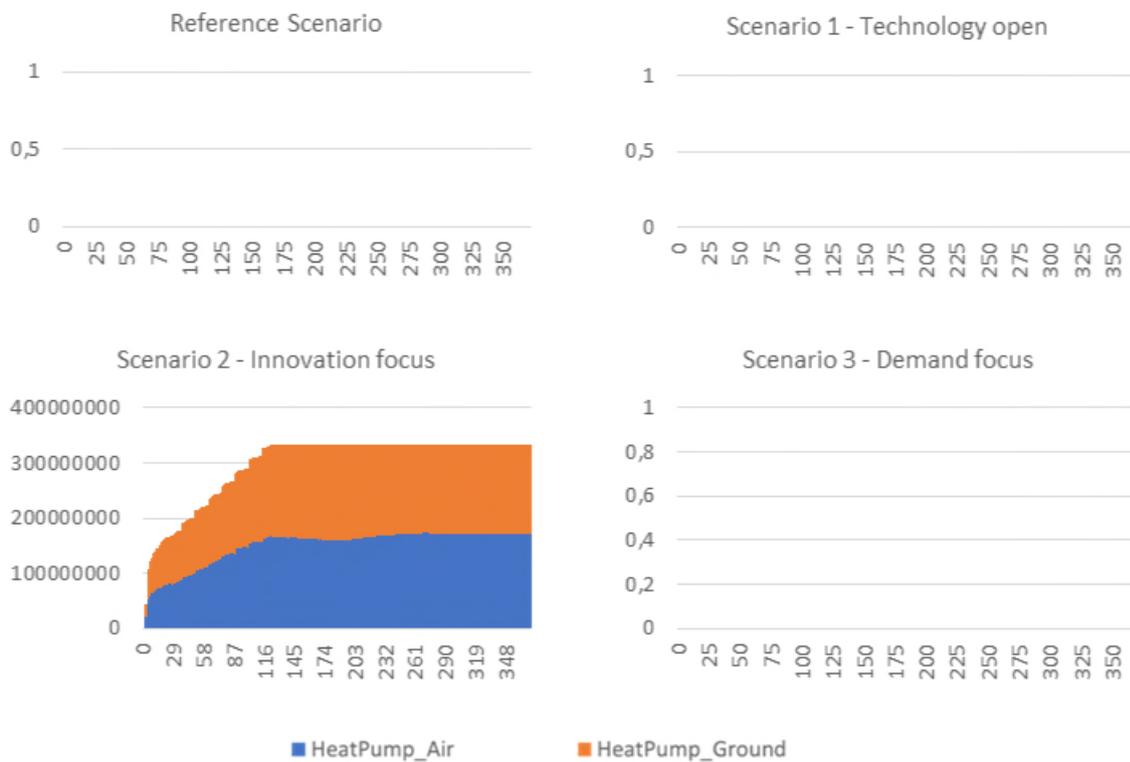
Die wichtigsten Annahmen hierbei sind:

- Nur für Szenario 2 - das sich besonders auf die Verbreitung erneuerbarer Technologien konzentriert - werden im Vergleich zu den anderen drei Szenarien relativ mehr Investitionen in das Bildungssystem getätigt.
- Der relativ stabile Anstieg der Ausgaben - für alle Szenarien - deutet auf eine relativ gleichmäßige Intensität der Einschulung über den gesamten Simulationszeitraum hin.

Weiterbildung von Installateuren

Bei der Weiterbildung von Installateuren geht es um zusätzliche Ausbildungsmöglichkeiten für bestehende Installateure, um neue Technologien zu erlernen und so ihr Produktportfolio zu diversifizieren (Abbildung 5). Dieses spezifische Fördersystem konzentriert sich auf die zusätzliche Förderung der Wärmepumpentechnologie durch das Angebot subventionierter Schulungsmöglichkeiten für Installateure, die lernen, wie man sowohl Luft- als auch Erdwärmepumpen installiert.

Abbildung 5 Geschätzte finanzielle Unterstützung für die Ausbildung von Installateuren in der Wärmepumpentechnik. X-Achse: Zeitschritte; Y-Achse: Kumulierter Investitionsbetrag (EURO)



Die wichtigsten Annahmen hierbei sind:

- Nur für Szenario 2 - das sich besonders auf die Verbreitung erneuerbarer Technologien konzentriert - wird in die zusätzliche Ausbildung von Installateuren in der Wärmepumpentechnologie investiert.
- Diese Stimulierung der Installateure findet nur in den ersten Jahren des simulierten Zeitraums statt. Danach wird die Ausbildung von Installateuren für die Wärmepumpentechnologie im Vergleich zu den für andere Technologien verfügbaren Ausbildungsmöglichkeiten nicht mehr zusätzlich angeregt.

4.2.3 Technologieentwicklung

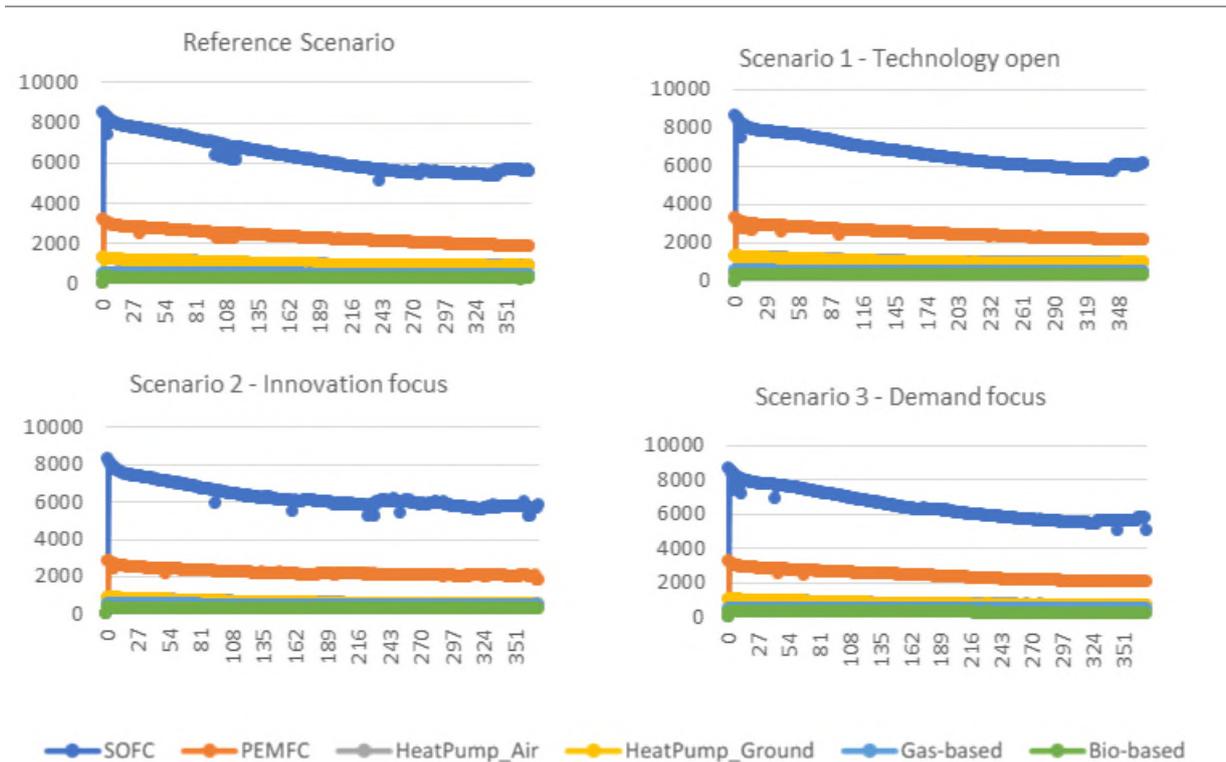
Im Hinblick auf die Technologieentwicklung wurde eine Reihe von marktbezogenen Konstrukten und Dynamiken modelliert und bewertet. Für die Diskussion der Ergebnisse in den nächsten Unterkapiteln konzentrieren wir uns auf die folgenden wesentlichen Aspekte:

- Lernkurven
- Produzentenpopulationen
- Systemnachfrage
- Erzeugerskalen
- Produzierte Produkte

Lernkurven

Die dargestellten Lernkurven (Verlauf der Herstellungskosten über die Zeit) beziehen sich auf die Gesamtkosten, die mit der Herstellung eines heiztechnischen Produkts verbunden sind (Abbildung 6). Die Lernkurven werden jeweils durch F&E, Learning-by-doing und Skaleneffekte beeinflusst.

Abbildung 6 Lernkurven für alle Technologien. X-Achse: Zeitschritte; Y-Achse: Durchschnittliche Gesamtkosten des Endprodukts (EURO)



Zu den wichtigsten Erkenntnissen gehören hier:

- Es gibt keine großen Unterschiede zwischen den Szenarien hinsichtlich der zeitlichen Entwicklung der Lernkurven der Technologien.
- Die Wirkung der modellinternen Stimulationsmechanismen - durch die unterschiedlich gesetzten politischen Maßnahmen - scheint daher begrenzt. Eine Hauptursache hierfür dürfte sein, dass die Lernkurvenentwicklung dominant von der Nachfrage beeinflusst wird. Da die Nachfrage extern bestimmt wurde (Invert) - sowie aufgrund der Beschaffenheit

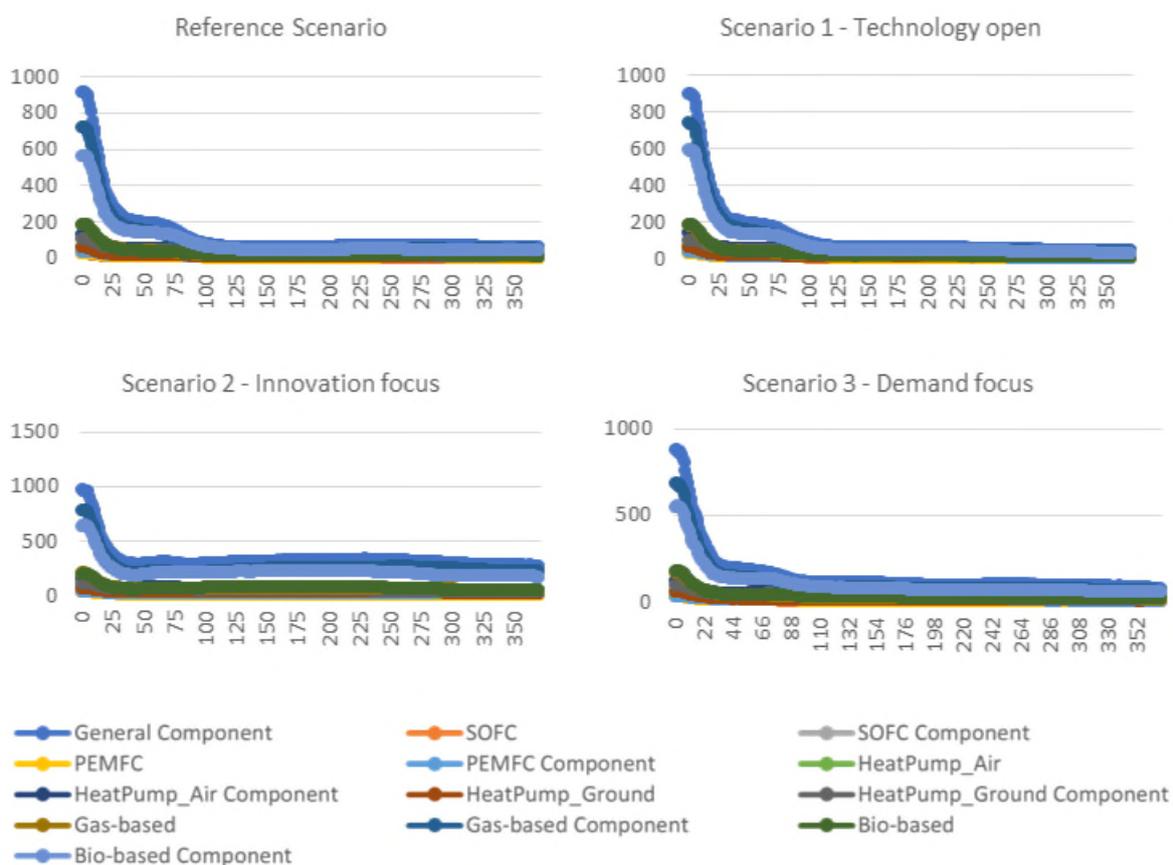
dieser entwickelten Schnittstelle zwischen Invert und SLICK (siehe auch MS6) - gibt es keinen direkten modellinternen Effekt von internen Unterstützungs- und Stimulationsmechanismen auf die Produktnachfrage.

- Insgesamt scheint diese Rückkopplung zwischen den beiden Modellen die Auswirkungen sowohl positiver als auch negativer Trends in Bezug auf Produktnachfrage und -angebot innerhalb von SLICK abzuschwächen.

Produzentenpopulationen

Die Produzentenpopulation ist die Anzahl der Unternehmen, die ein bestimmtes Produkt herstellen (Abbildung 7). Die Größe der Population wird hauptsächlich durch den Erfolg der einzelnen Unternehmen in Bezug auf die Marktleistung beeinflusst; wenn ein Unternehmen langfristig nicht rentabel ist, wird es schließlich das System verlassen.

Abbildung 7 Erzeugerpopulation - Hersteller von Endprodukten und Komponenten aller Heiztechnologien. X-Achse: Zeitschritte; Y-Achse: Anzahl der Hersteller pro Technologie



Zu den wichtigsten Erkenntnissen gehören hier:

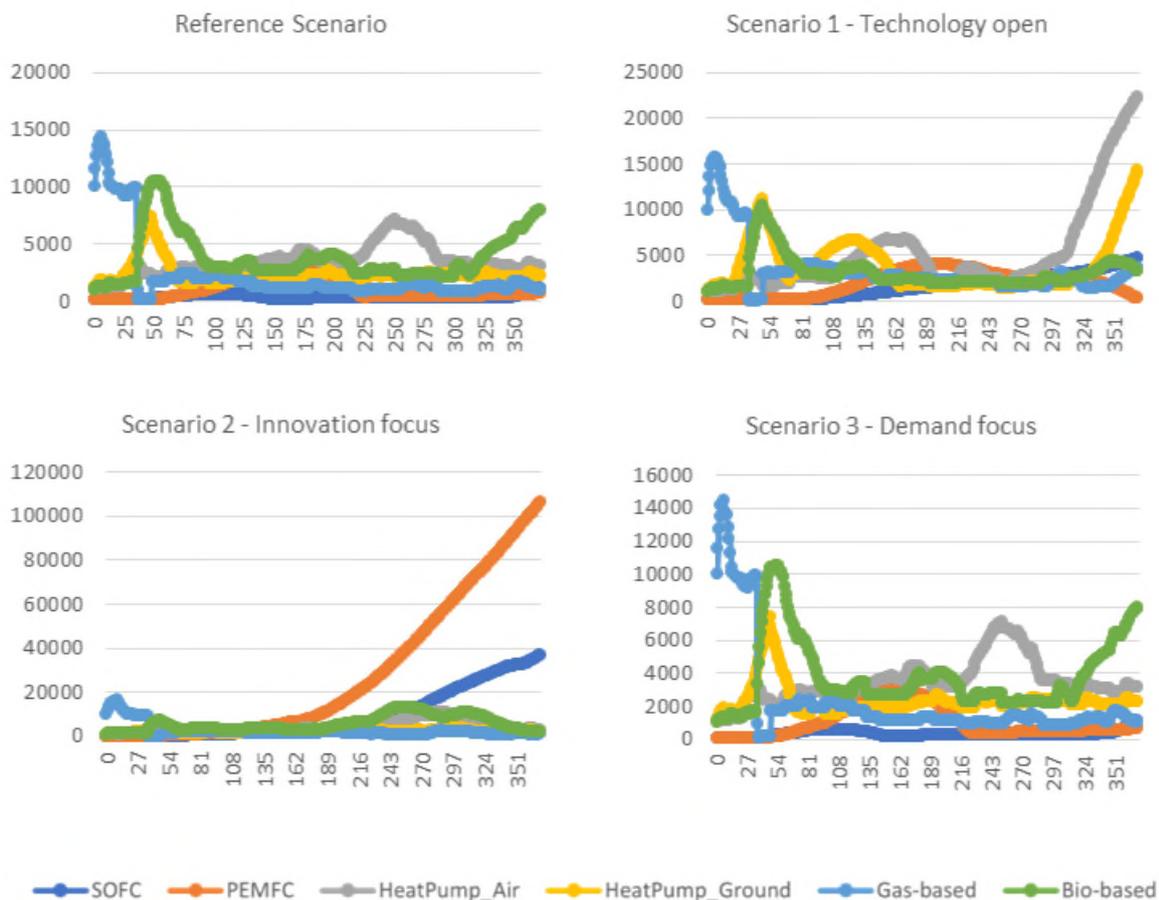
- Bei allen Szenarien zeigt sich, dass sich die Populationen - nach der modellspezifischen Marktbereinigung (shake-out) der Unternehmen zu Beginn - stabilisieren.
- Nur für Szenario 2 gibt es einige Populationen, die deutlich größer sind. Dabei handelt es sich vor allem um Komponentenproduzenten (d.h. allgemeine Komponentenproduzenten,

Komponentenproduzenten für nicht erneuerbare Gastechnologien, Komponentenproduzenten für Biomasetechnologien); Produzenten, die anfangs auch die größte Population hatten.

Systemnachfrage

Die Systemnachfrage bezieht sich auf die Gesamtnachfrage zu einem bestimmten Zeitpunkt für eine bestimmte Heiztechnologie (Abbildung 8). Wenn die Zahl der Anlagen nicht ausreicht, den Wärmebedarf in einem Monat / in einem bestimmten Zeitschritt zu decken, wird dieser Bedarf im Simulationsmodell auf den nächsten Zeitschritt übertragen. Wenn die nachgefragten Anlagen aufgrund von Installateurs- oder Produktionsengpässen nicht installiert werden können, werden sie in eine Warteschlange gestellt. Steigende Kurven bedeuten nicht abdeckbare Nachfragen.

Abbildung 8 Systemnachfrage für eine bestimmte Heiztechnologie in einem bestimmten Zeitschritt. X-Achse: Zeitschritte; Y-Achse: Höhe der Nachfrage (einzelne Produkte), die nicht erfüllt werden kann



Zu den wichtigsten Erkenntnissen gehören hier:

- In allen Szenarien gibt es Phasen, in denen sich eine erhöhte Nachfrage aufbaut.
- Es gibt eine klare Tendenz, dass bei Technologien, die eine geringe absolute Nachfrage pro Zeiteinheit haben (insbesondere die Brennstoffzellentechnologie), eine hohe kumulative Nachfrage besteht. Ein wahrscheinlich dominierender Faktor ist hier, dass Installateure

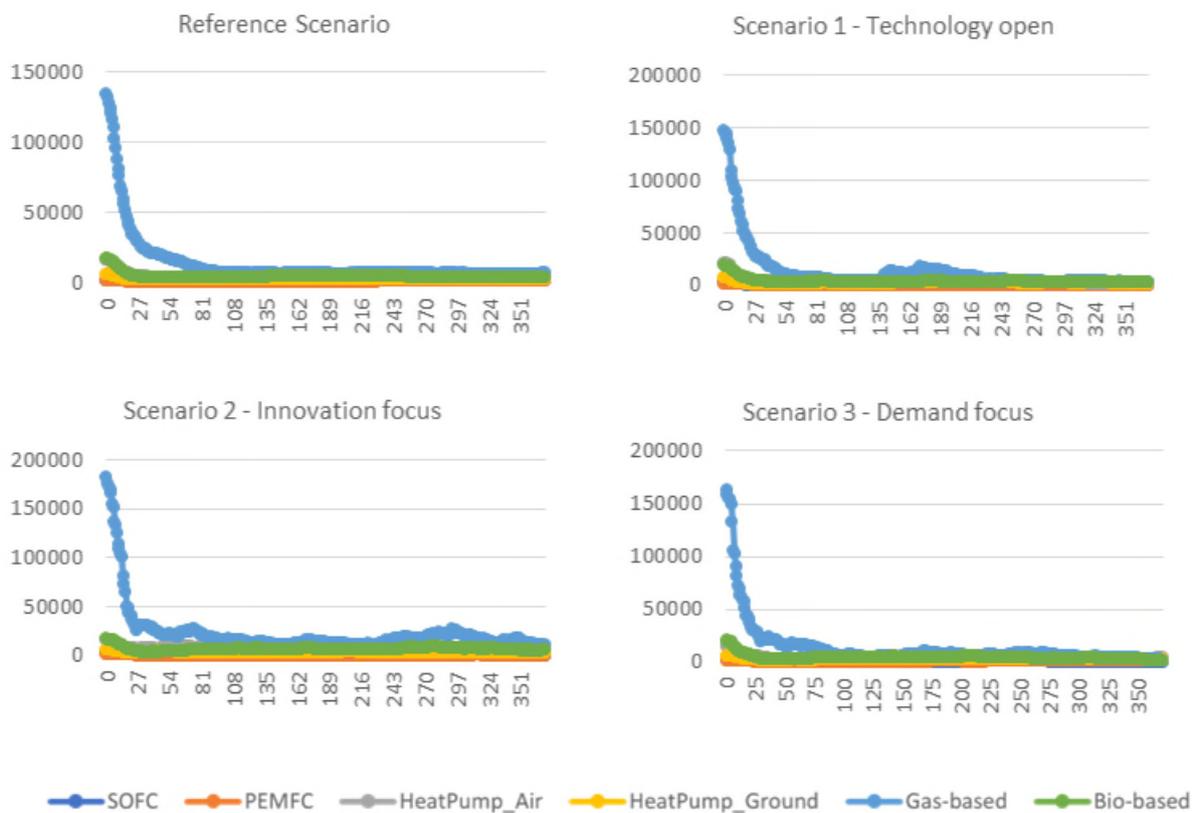
dazu neigen, Technologien zu installieren (und zu erlernen), die derzeit eine hohe Nachfrage haben. Aufgrund des hohen Zeitaufwands für die Ausbildung und zusätzliche Schulung der Installateure reagiert das System mit großer Verzögerung auf die steigende Nachfrage.

- Das Prinzip des "freien Marktes" in Szenario 1 scheint die Installationskapazität des Systems für Wärmepumpen zu verringern und führt daher zu einem erheblichen Anstieg der unbefriedigten Gesamtnachfrage nach Wärmepumpen.
- Die starke Fokussierung der Förderung auf Wärmepumpen in Szenario 2 scheint diesen Effekt auszugleichen; dies scheint jedoch den Nischentechnologien der Brennstoffzellen nicht zu nutzen. Die Nachfrage kann nicht erfüllt werden, da nur sehr wenige Firmen Brennstoffzellen installieren können.

Produktionsskalen

Die Produktionsskala eines Herstellers gibt die Gesamtmenge der Endprodukteinheiten an, die pro Zeitschritt produziert werden können (Abbildung 9). Durch die Entwicklung von Angebot und Nachfrage kann die Skala entweder abnehmen (wenn der Absatz begrenzt ist) oder zunehmen (durch Investitionen nach einer Periode mit ausreichendem Absatz).

Abbildung 9 Durchschnittliche Größenordnung der Endproduzenten, für alle Heiztechnologien. X-Achse: Zeitschritte; Y-Achse: Summe der produzierbaren Einheiten je Technologie



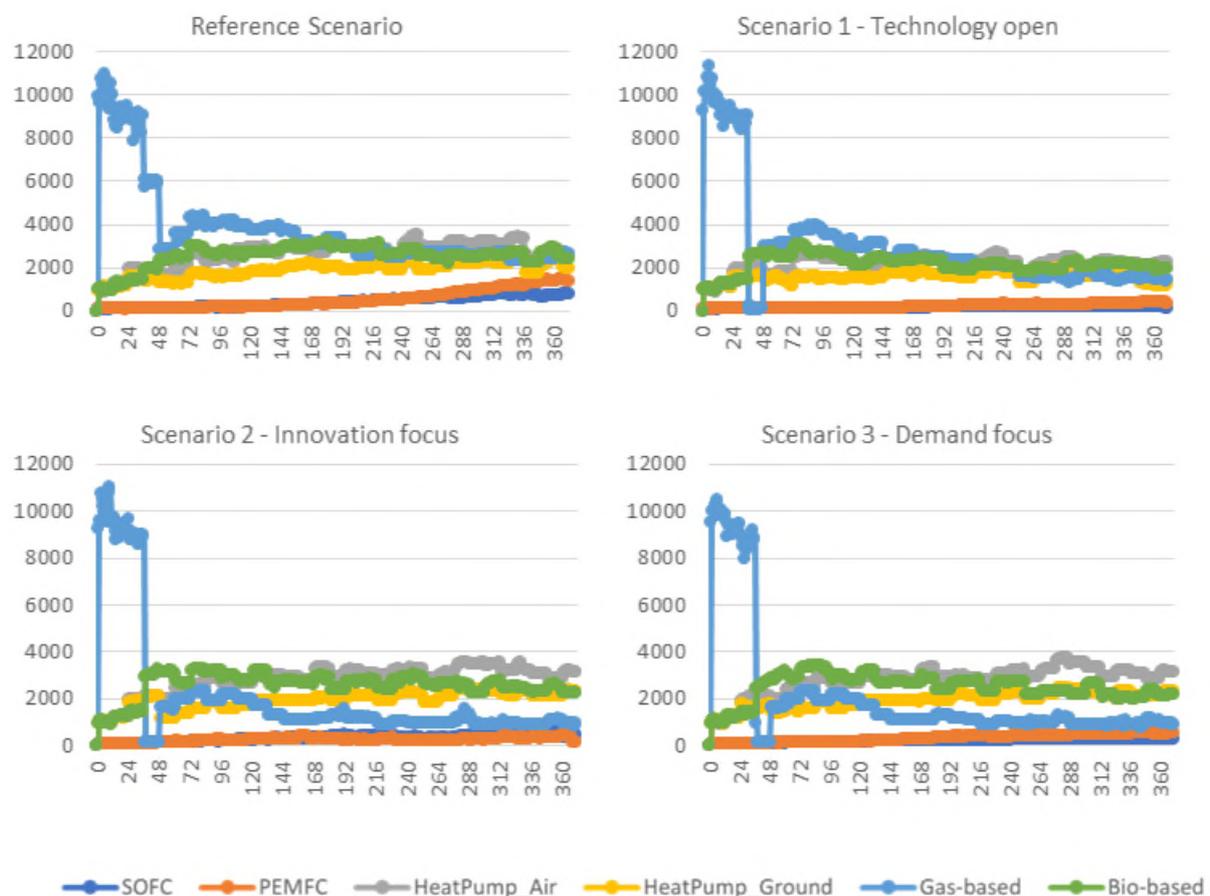
Zu den wichtigsten Erkenntnissen gehören hier:

- Nach der anfänglichen Marktberreinigung (shake-out) bleiben die Produktionsskalen unter allen technologischen Bereichen der Produzenten stabil.
- Interessanterweise profitieren die Hersteller von "nicht-erneuerbaren Gastechnologien" in Szenario 2 am meisten, was das Größenwachstum angeht. Obwohl dieses Szenario auf die Förderung von mehr erneuerbaren Technologien ausgerichtet ist, scheinen die etablierten Technologiebereiche indirekt relativ stark von Investitionen auf Systemebene zu profitieren (z. B. verbesserte Aus- und Weiterbildungsstrukturen für Installateure).

Produzierte Produkte

Der Indikator der produzierten Produkte entspricht der Gesamtmenge der produzierten Produkte innerhalb einer bestimmten Technologieproduzentenpopulation zu einem bestimmten Zeitpunkt (Abbildung 10).

Abbildung 10 Gesamtmenge der produzierten Produkte innerhalb einer bestimmten Technologieproduzentenpopulation. X-Achse: Zeitschritte; Y-Achse: Gesamtmenge der produzierten Produkte



Zu den wichtigsten Erkenntnissen gehören hier:

- Szenarien, in denen relativ viel in Technologien für erneuerbare Energien investiert wird (Szenario 2 und 3), führen zu einem höheren Produktionsniveau dieser spezifischen Technologien.
- Ein freier marktwirtschaftlicher Ansatz (Szenario 1) scheint, vor allem längerfristig, ein relativ niedrigeres Produktionsniveau für alle Technologien zu bewirken. Dies führt jedoch nicht per se zu einem technologischen Lock-in, da die anfänglich dominierende nicht-erneuerbare Technologie auf Gasbasis im Laufe der Zeit hinter andere Technologien zurückfällt. Dies wird auch stark durch sich ändernde Nachfragemuster beeinflusst (modellextern bestimmt).

4.2.4 Installateurspopulation

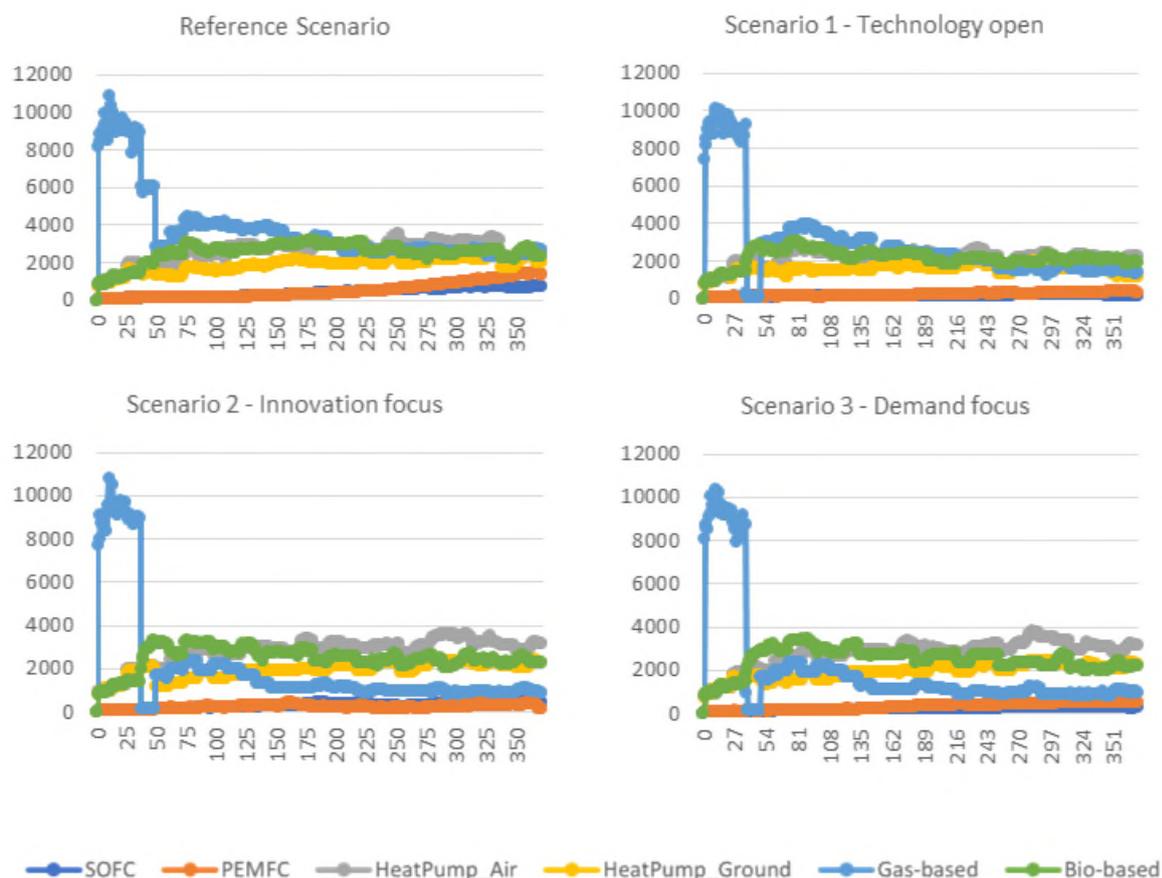
Um die Auswirkungen auf die Population der Installateure zu erkennen, wurde eine Reihe von individuellen und populationsbezogenen Merkmalen simuliert und bewertet. Für die Analyse werden die folgenden Aspekte herausgestellt:

- Zahl der Installationen
- Installationskapazität
- Aktiv installierte Technologie
- Strategie der Installateure
- Firmenportfolio

Installationen

Die Zahl der Installationen gibt die Gesamtzahl der ausgeführten Installationen bestimmter Heiztechnikprodukte pro Zeiteinheit an (Abbildung 11).

Abbildung 11 Installationen bestimmter Heiztechnikprodukte. X-Achse: Zeitschritte; Y-Achse: Anzahl der Installationen



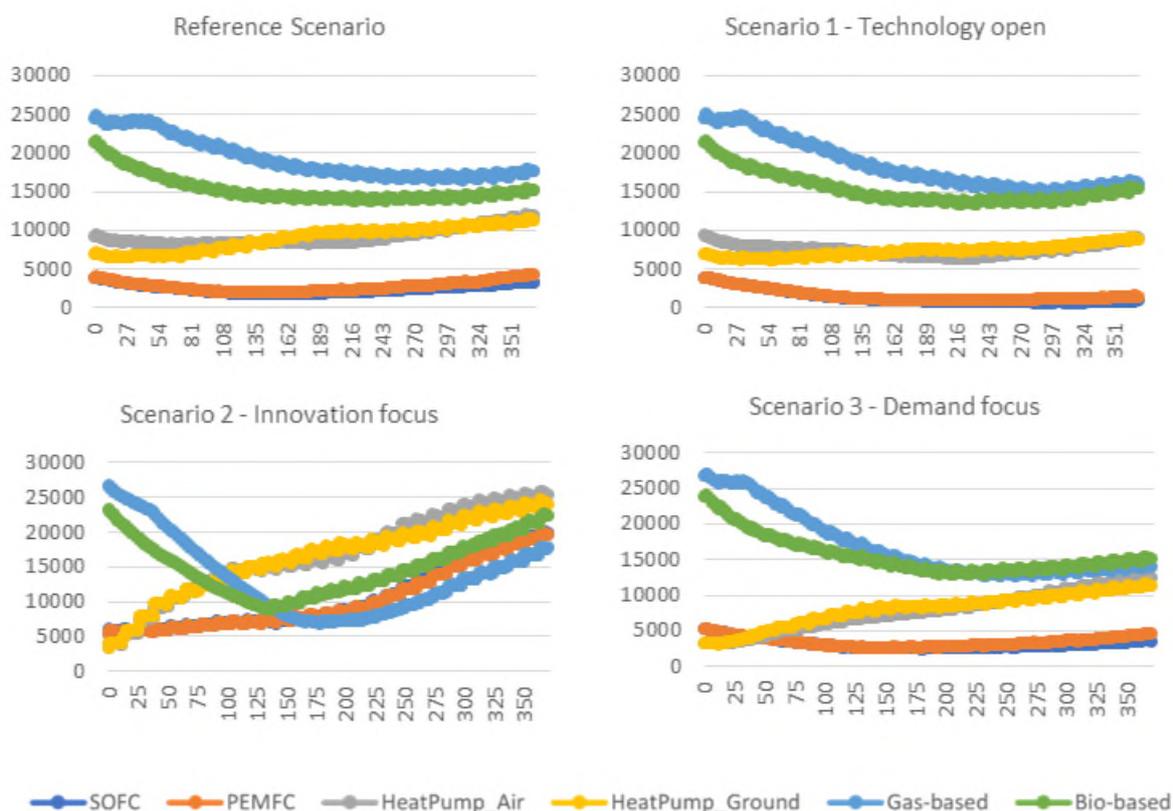
Zu den wichtigsten Erkenntnissen gehören hier:

- Im Allgemeinen gibt es nur geringe Unterschiede zwischen den Szenarien, trotz der erheblichen Unterschiede in der Strategie in Bezug auf die Schulung von Installateuren und die Ausbildung von Installateuren, einschließlich Maßnahmen, die sich besonders auf erneuerbare Technologien konzentrieren.
- Das einzige Szenario, das heraussticht, ist Szenario 1, das hinsichtlich der Anzahl der installierten Produkte, vor allem langfristig, am schlechtesten abschneidet. Dies deutet darauf hin, dass ein bestimmtes Maß an verschiedenen Investitionen in die Förderung der Aus- und Weiterbildung zu einer größeren Anzahl an installierten Anlagen führt (Szenario 2). Ein Vergleich mit Szenario 3 (Fokus: Marktförderung) zeigt, dass aber auch eine Kombination von Marktförderung mit geringerer Aus- und Weiterbildungsförderung zu ähnlichen Zahlen führen kann, das Kosten-Nutzen-Verhältnis in Szenario 2 also noch nicht optimal ist.

Installationskapazität

Die Installationskapazität gibt die Zahl der Installation der verschiedenen Technologien an, die ein Installateur pro Zeiteinheit installieren kann (Abbildung 12). Dargestellt ist die Summe aller Installationskapazitäten. Diese kann im Laufe der Zeit zu- und abnehmen, je nachdem, wie aktiv ein Installateur in einem bestimmten Bereich der Heiztechnik ist.

Abbildung 12 Aggregierte Gesamtinstallationskapazität der Installateure für verschiedene Heiztechnologien, basierend auf der verfügbaren Kapazität, die dem Produktportfolio der einzelnen Installateure zugeordnet ist. X-Achse: Zeitschritte; Y-Achse: Gesamtkapazität (installierbare Einheiten)



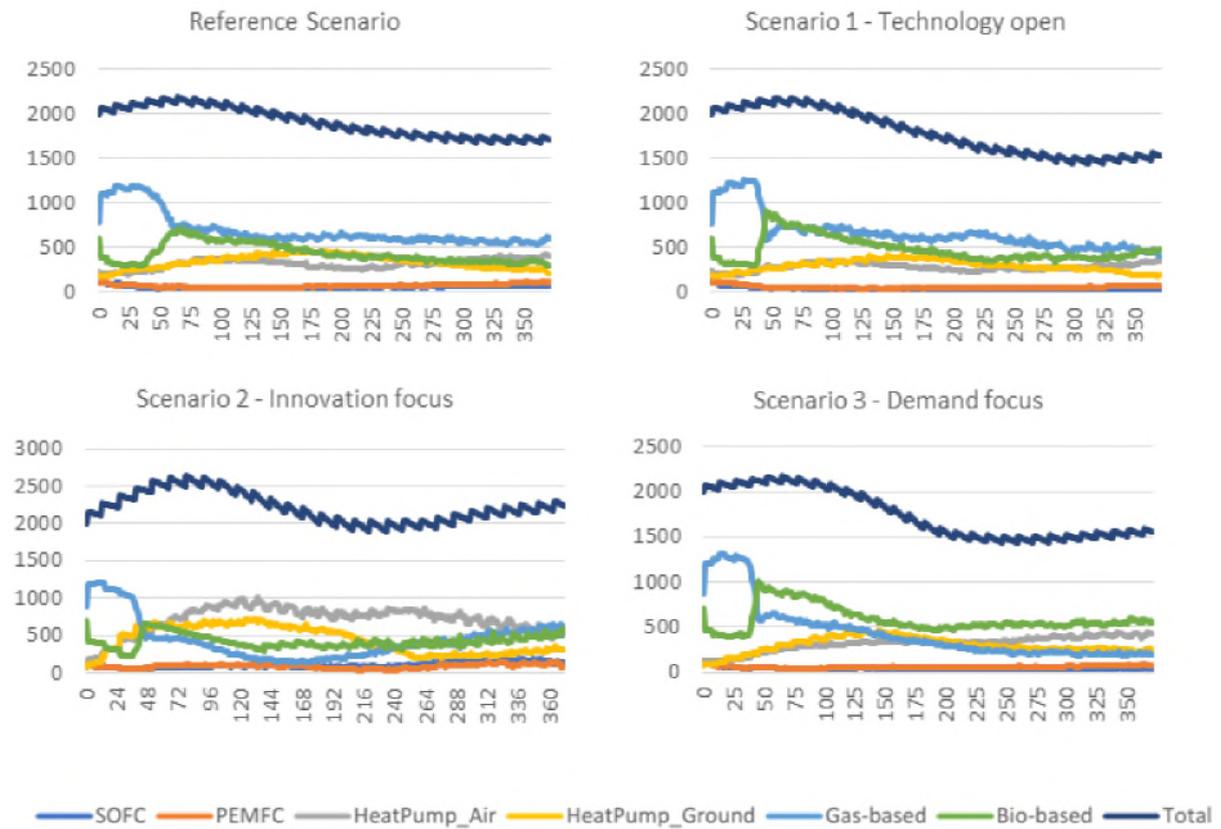
Zu den wichtigsten Erkenntnissen gehören hier:

- In den Ergebnissen ist ein starker Einfluss politischer Maßnahmen auf die Installationskapazitäten der Installateure zu beobachten, hauptsächlich durch verbesserte Aus- und Weiterbildungsmöglichkeiten - mit einem besonderen Schwerpunkt auf der Wärmepumpentechnologie.
- Dieser Effekt der Politik zeigt sich besonders stark in Szenario 2; in den anderen Szenarien ist die Kapazität der Installateure in Bezug auf ihr Technologieportfolio ähnlich zueinander.

Aktive Technologie

Der Indikator der aktiven Technologien gibt die Anzahl der Installateure, die in der jeweiligen Zeitperiode eine Technologie aktiv installiert (Abbildung 13). Obwohl ein Installateur mehrere Produkte in seinem Produktportfolio haben kann, werden möglicherweise nicht alle davon aktiv für die Installation von Heizungsanlagen genutzt. Sie gibt also an, welche Heiztechniken die Installateure zu einem bestimmten Zeitpunkt am häufigsten einsetzen.

Abbildung 13 Aktive Technologie der Installateure im Hinblick auf die Installationstätigkeit für eine bestimmte Heiztechnologie. X-Achse: Zeitschritte; Y-Achse: Anzahl der Installateure



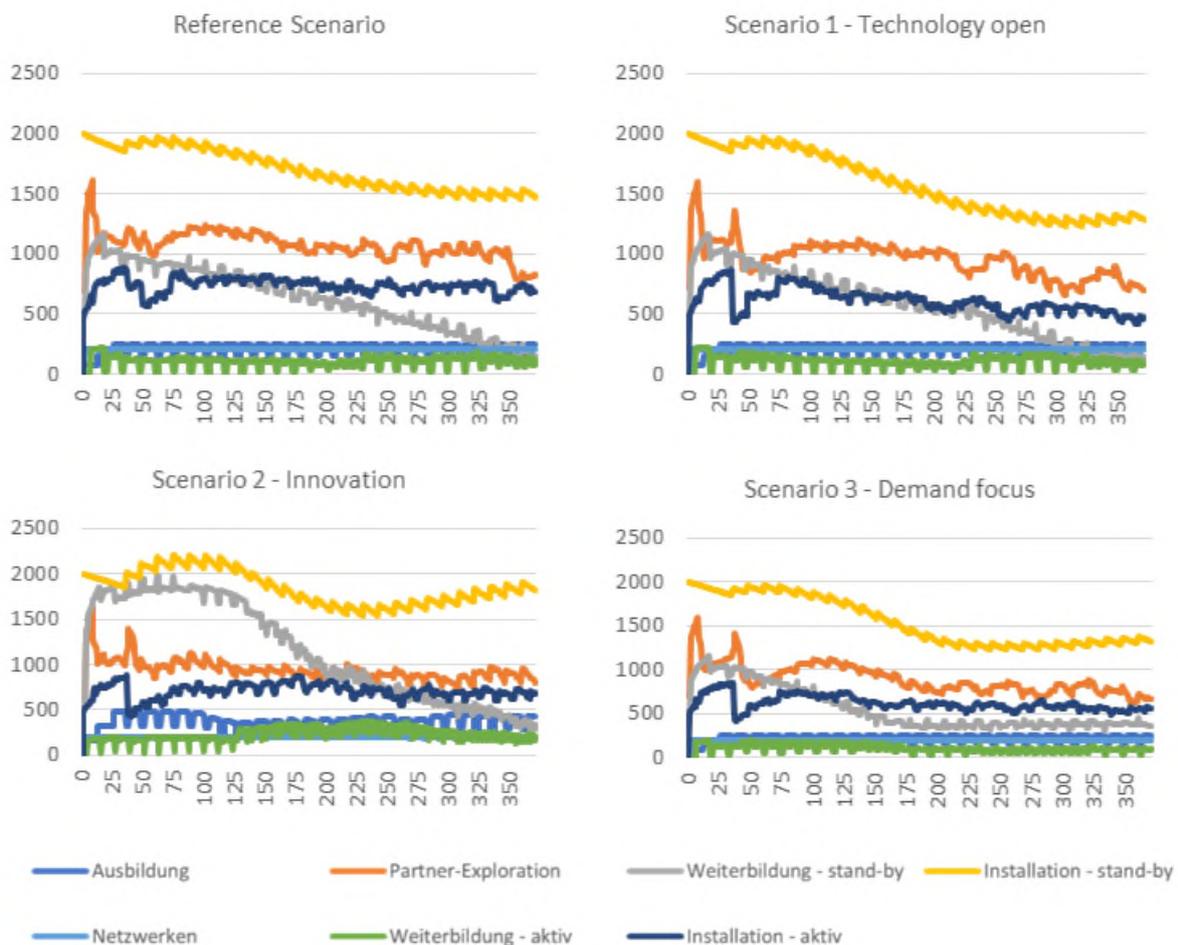
Zu den wichtigsten Erkenntnissen gehören hier:

- Insgesamt zeigt sich, dass die Gesamtbevölkerung an Installateuren bei Szenario 2 am größten ist. Dies ist nicht unerwartet, da die Kapazität des Bildungssystems für Installateure verbessert wurde.
- In Szenario 2, das sich auf die Förderung nachhaltiger Technologien konzentriert, zeigt sich, dass die dominierende Technologie "nicht-erneuerbares Gas" auch langfristig von verbesserten Systembedingungen profitiert.
- Von den beiden Wärmepumpentechnologien scheint vor allem die Luft-Wärmepumpentechnologie von verbesserten Bedingungen zu profitieren. Die Erdwärmepumpentechnologie - die relativ gesehen teurer ist und weniger nachgefragt wird - scheint im Vergleich zur Luft-Wärmepumpentechnologie weniger zu profitieren.

Strategie des Installateurs

Die Strategie des Installateurs betrifft die Maßnahmen, die er zu einem bestimmten Zeitpunkt ergreift (Abbildung 14). Welche Maßnahmen ein Installateur wählt, kann von verschiedenen Faktoren abhängen, u. a. von der Installationstätigkeit und -leistung, dem verfügbaren Produktportfolio sowie dem aktuellen Firmenportfolio.

Abbildung 14 Installateure, die eine bestimmte die Art der Handlung in dem jeweiligen Zeitschritt durchführen. X-Achse: Ticks; Y-Achse: Gesamtzahl der spezifischen Aktionen aller Installateure



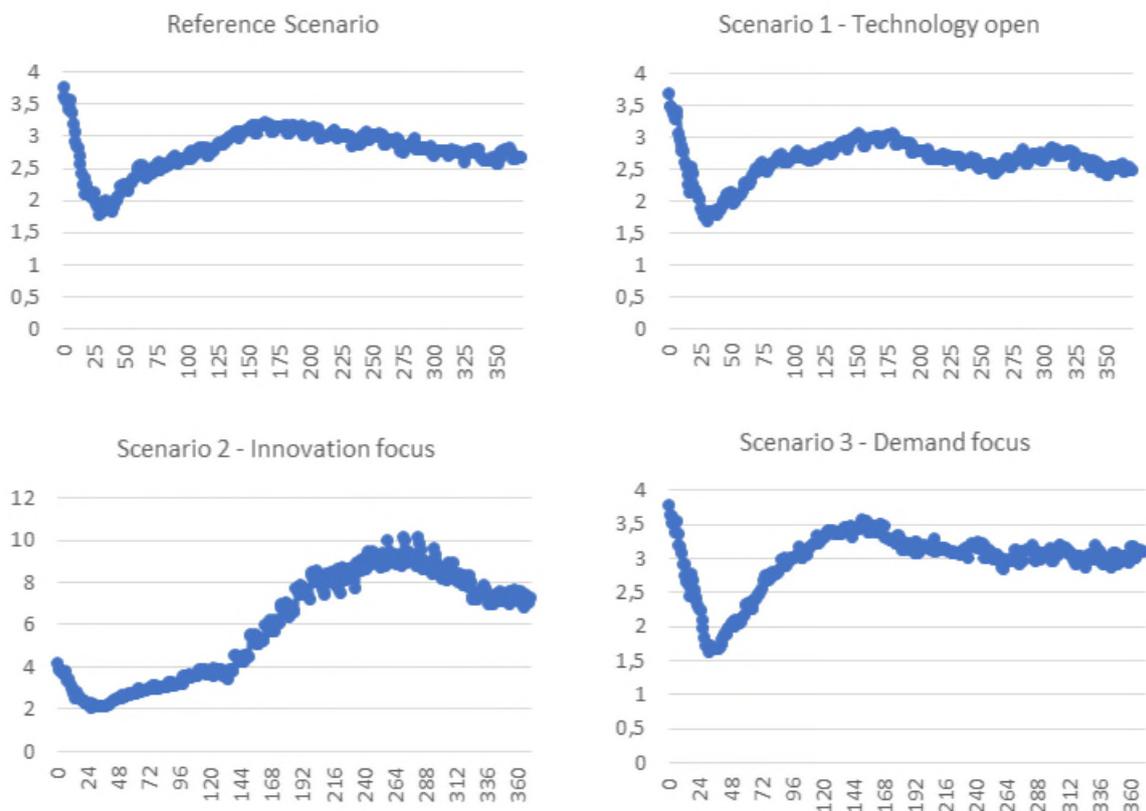
Zu den wichtigsten Erkenntnissen gehören hier:

- In Szenario 2 ist das Verhalten der Installateure aufgrund der eingebetteten politischen Maßnahmen zur Förderung der Ausbildung in nachhaltigen Technologien stark auf das Erlernen neuer Technologien ausgerichtet. Gegen Ende der Simulation scheint sich dieser Trend wieder zu normalisieren.
- Auch aufgrund der höheren Kapazität der Bildungssysteme in Szenario 2 sehen wir im Vergleich zu den anderen Strategien eine insgesamt höhere absolute Menge an Aktivitäten. Dies führt jedoch nicht notwendigerweise zu einem signifikanten Anstieg der Installationen.

Firmenportfolio

Das Firmenportfolio betrifft die Anzahl der Herstellerfirmen, die ein Installateur in seinem Portfolio hat (Abbildung 15). Da ein Installateur nur Anlagen eines Herstellers installieren kann, den er in seinem Portfolio hat, erhöht sich die Chance, zu einem bestimmten Zeitpunkt Anlagen zu installieren, wenn er mehr Firmen im Portfolio hat. Um jedoch Firmen im Firmenportfolio zu haben, müssen solche geeigneten Firmen erst gefunden werden.

Abbildung 15 Größe des Firmenportfolios der Installateure. X-Achse: Zeitschritte; Y-Achse: Durchschnittliche Anzahl der Produzenten im Firmenportfolio



Zu den wichtigsten Erkenntnissen gehören hier:

- Es gibt einen starken Unterschied in der durchschnittlichen Größe des Firmenportfolios zwischen Szenario 2 und den anderen Szenarien; die durchschnittliche Größe der Installateure in Szenario 2 ist deutlich höher.
- Dieses allgemein größere Firmenportfolio der Installateure in Szenario 2 ist auf die stärkere Aktivität bei Lernprogrammen und damit auf die bessere Diversifizierung der Technologieportfolios der Installateure zurückzuführen.
- Auch bei großer durchschnittlicher Größe des Firmenportfolios, ist nicht automatisch auch die tatsächliche Installationstätigkeit der einzelnen Firmen höher. Insbesondere für Szenario 2, bei dem die Gesamtpopulation der Installateure am größten ist, führt der Wettbewerb zwischen relativ vielen Installateuren in einem System mit einer ähnlichen Anzahl von Technologieherstellern wahrscheinlich einfach zu einer geringeren Arbeitsauslastung der Unternehmen.

4.2.5 Fazit

Auf Grundlage der erzielten Ergebnisse wurden zahlreiche Erkenntnisse gewonnen. Einige der wichtigsten Schlussfolgerungen sind:

- **Grenzen von gezielten Investitionen:** Die Ergebnisse zeigen, dass mehr Investitionen in eine bestimmte Richtung nicht unbedingt direkt zu den gewünschten Verbesserungen führen. Obwohl ein gewisses Maß an Förderungen zur Unterstützung gewünschter Systeme im Allgemeinen vorteilhaft zu sein scheint, haben die Ergebnisse auch gezeigt, dass dem Ausmaß der technologischen (Diffusions-)Gewinne, die infolge starker Förderungen erzielt werden können, Grenzen gesetzt sind. Es gibt Hinweise darauf, dass zu hohe Förderungen in eine Richtung kontraproduktiv sein können, entweder durch indirekte Stimulierung bestehender dominanter Technologien (z. B. gasbasierte Technologien) oder durch den Aufbau von Hemmnissen für andere gewünschte Nischentechnologien (z. B. Brennstoffzellen).
- **Nischen- versus marktbeherrschende Technologien:** Ein Ergebnis der SLICK-Simulationen zeigt, dass sich verbesserte Systembedingungen durch eine Politik, die auf die Förderung bestimmter gewünschter Technologien ausgerichtet ist, unbeabsichtigt auch positiv auf andere, unerwünschte aktuell dominante Technologien auswirken können. Solche Effekte können erhebliche Auswirkungen auf die Richtung der Innovationsdynamik haben.
- **Bedeutung einer komplexen Politikgestaltung:** Darüber hinaus zeigen die Ergebnisse, dass politische Strategien, die auf die Umsetzung einzelner Instrumente zur Steuerung von Technologieverbreitungsmustern ausgerichtet sind, schon aufgrund der Grenzen ihrer Wirksamkeit, nicht kosteneffizient sind oder indirekt eine Dynamik verursachen, die nicht immer mit den ursprünglichen Absichten der Technologiepolitik übereinstimmt. Aus den Ergebnissen lässt sich ersehen, dass es die Komplexität der Energiesysteme auch erfordert, mehrere Förderinstrumente gleichzeitig zu nutzen, um ungewollte Hemmnisse und Förderungen zu vermeiden. Zusätzlich zu einfachen allgemeinen Maßnahmen können unterstützende Maßnahmen auf mehreren Ebenen der Märkte sinnvoll sein um die Vielzahl der vielschichtigen Interaktionen zwischen verschiedenen Akteuren innerhalb der Innovationssysteme zu berücksichtigen.

Herausforderungen der Modellkopplung – Mäßigung der Modelldynamik

Aus den Ergebnissen der Simulationen wurden auch einige Herausforderungen deutlich. So hat die externe Integration von Nachfragedaten und die geringe Rückkopplung zwischen Angebot und Nachfrage wahrscheinlich dazu geführt, dass nur moderate Trends im Innovationsraum zu beobachten waren. Da die in SLICK verwendeten Nachfragedaten extern durch Invert erstellt wurde und so nicht alle SLICK-eigenen Dynamiken einbezogen werden können, können Entwicklungen in SLICK, die eigentlich zu starken „Nachfrageänderungen“ führen sollten, sich nicht durchsetzen und werden durch importierte Nachfragedaten, die auf der Grundlage einer anderen Modelllogik erstellt wurden, „überlagert“. Es war zu sehen, dass auch das Gegenteil möglich ist. Wenn potenziell modellierte Situationen innerhalb von SLICK zu einer stabilen Produktnachfragedynamik führen würden, die externen Nachfragedaten jedoch signifikante Änderungen der Nachfrage-trends aufweisen, können diese dann unter Umständen durch das in SLICK simulierte Angebot nicht gedeckt werden.

Die in den Modellierungen durchgeführte leichte Kopplung der Modelle scheint nicht stark genug zu sein um die unterschiedlichen Entwicklungen, z.B. über Wirkungen von Preissignalen, zu kom-

munizieren. So können sich Stimuli, die von Technologieherstellern initiiert werden, nicht in logischer Weise auf das gesamte Innovationssystem übertragen. Dies könnte auch zur Entstehung von „Nachfragetunneln“ geführt haben, d. h. Situationen, in denen das modellierte System nicht angemessen auf große Lücken zwischen Produktnachfrage und Produktverfügbarkeit reagieren kann. Ein Teil dieser potenziellen Fehlanpassungen könnte entweder durch komplexere Schnittstellen zwischen externen Modellen oder durch die interne Modellierung verschiedener Produktnachfrage-Dynamiken durch SLICK gelöst werden. Die Beobachtung solcher Effekte im Modell macht auch deutlich, dass Fördermaßnahmen auf verschiedenen Ebenen gut aufeinander abgestimmt sein sollten und die marktwirtschaftlichen Wechselwirkungen wichtig sind, um effiziente Lösungen zu etablieren.

Künftige Forschung

Im Zusammenhang mit den gewonnenen Erkenntnissen wurden einige Möglichkeiten für die künftige Forschung aufgezeigt. Dazu gehören:

- **Rolle von Standardisierungen:** Im Zusammenhang mit der Notwendigkeit komplexer politischer Lösungen, die darauf abzielen, die Systemdynamik auf strategische Weise zu beeinflussen, wäre die Untersuchung der Rolle der Standardisierung bei der Förderung bestimmter Technologien ein spannender zukünftiger Forschungsgegenstand. Obwohl Standards als Instrumente bekannt sind, die potenziell zu fokussierten Produktionsmustern und effektiveren Wissensflüssen innerhalb von Innovationssystemen führen, können Standards auch den Grad der operativen Freiheit und den Grad der epistemologischen Vielfalt begrenzen, was zu Ineffizienzen führen kann.
- **Optimierung der politischen Maßnahmen:** Ein Ziel zukünftiger Forschung könnte die Optimierung von Politikmaßnahmen darstellen. In Manifold wurden mehrere vordefinierte politische Maßnahmen unter verschiedenen Aspekten bewertet. Die Ergebnisse haben gezeigt, dass die Auswahl und die Intensität der politischen Maßnahmen die Systemdynamik oft in nicht trivialer Weise beeinflussen können. Eine stärkere Fokussierung auf die strategische Multi-Policy-Optimierung könnte die Erkenntnisse über den kontextspezifischen Wert der verschiedenen verfügbaren politischen Maßnahmen verbessern.

4.3 Ergebnisse der Diffusionsmodelle

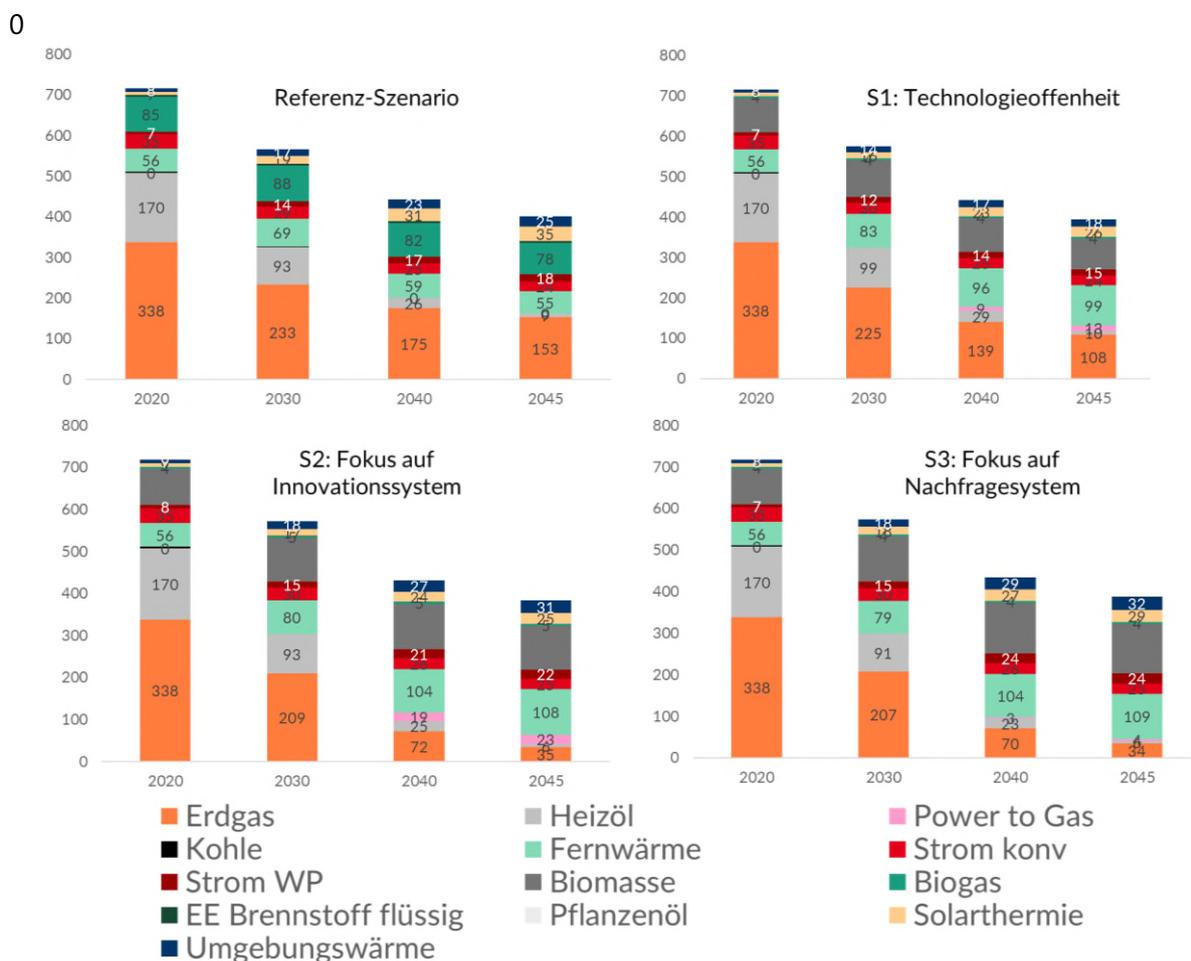
4.3.1 Modellergebnisse Invert-ee/lab unter Berücksichtigung von Technologiegenese und Entscheidungsverhalten

Abbildung 14 zeigt die Ergebnisse mit Bezug auf die Entwicklung des Endenergiebedarfs des gesamten Gebäudesektors in den modellierten Szenarien. Da die Politikinstrumente für Effizienzmaßnahmen im Gebäudesektor in allen Szenarien gleichgeblieben sind, ist der Rückgang des Endenergiebedarfs in den Szenarien auf ähnlichem Niveau, wobei sich aufgrund der Technologiewahl deutliche Unterschiede in der Entwicklung der eingesetzten Energieträger ergeben. Die Unterschiede beim Endenergiebedarf sind auf unterschiedliche Effizienzen der eingesetzten Wärmeversorgungssysteme zurückzuführen sowie auch zu geringem Anteil auf die Rückkopplung zu der Investitionsentscheidung in Effizienzmaßnahmen durch die eingesetzten Wärmeversorgungssysteme. Die Investitionsentscheidung in Effizienzmaßnahmen wird jedoch nicht mit dem Manifold-Ansatz durch Modellkopplung modelliert.

Die Unterschiede zwischen den Szenarien resultieren somit maßgeblich aus der Wahl der Wärmeversorgungssysteme über den Simulationszeitraum und der daraus resultierenden Pfade:

- Der Endenergieverbrauch für Raumwärme und Warmwasser im Gebäudesektor reduziert sich in den Szenarien im Zeitraum von 2020 bis 2045 um 44 % im Referenzszenario, in den Politikszenarios ist die Reduktion etwas höher und liegt bei 45 bis 46 %.
- Beim Einsatz fossiler Energieträger wird der Einsatz von Heizöl in allen Szenarien bis 2045 fast komplett reduziert. Der Unterschied zwischen Referenz- und Zielszenarien ist mit Bezug auf die in den Gebäuden verbliebenen Technologien nicht signifikant, da Installationsverbot für neue Heizölheizungen bereits im Referenzszenario berücksichtigt wird. Der verbliebene Heizölbedarf wird in den Zielszenarien durch flüssige erneuerbare Brennstoffe (biogen oder synthetisch) ersetzt, was in der gesamtsystemischen Szenarienmodellierung untersucht wird (vgl. Kapitel 5). Ein signifikanter Unterschied zwischen den Szenarien zeigt sich im Entwicklungspfad für Gas und dessen Ersatz durch biogene und synthetische erneuerbare Brennstoffe.
- Im Referenzszenario wird der Einsatz von Erdgas bis 2030 um 31 % reduziert und bis 2045 um 54 %. Während im Szenario Technologieoffenheit der Einsatz von Erdgas bis 2045 mit der Aussicht auf eine Dekarbonisierung durch Power-To-Gas weniger restriktiv eingegrenzt wird, wird dieser in den Szenarien S2 und S3 stärker restriktiv behandelt. Auch der Fokus der Förderung im Innovationssystem und der Weiterbildung von Installateuren ist im Szenario S2 stärker auf Wärmepumpen ausgerichtet. Während der Anteil von Erdgas an der Wärmeversorgung im Gebäudebereich im Jahr 2030 im Szenario S1- Technologieoffen noch bei 39 % liegt, ist dieser in den Szenarien S2 – Fokus Nachfrageseite und S3 – Fokus Innovationssystem bereits 37 % bzw. 36 % gesunken.
- Bis zum Jahr 2045 ist der Unterschied zwischen den Zielszenarien noch deutlicher. Im Szenario S1 – Technologieoffenheit hat die leitungsgebundene Gasversorgung (Power-to-gas, Biogas) noch einen Anteil von 31 % an der Wärmeversorgung. Im Szenario S2 beträgt diese 12,7% und im Szenario S3 11 %.

Abbildung 14: Entwicklung des Endenergieverbrauchs im Gebäudesektor und im Manifoldbereich im Referenzszenario



Für den Vergleich zwischen dem Szenario Technologieoffenheit und den „Fokus-Szenarien“ (S2, S3) ist zu erwähnen, dass die Investitionsentscheidung der im Modell hinterlegten Agenten mit dem Wissenstand zu dem jeweiligen Zeitpunkt erfolgt. Das heißt höhere Energiepreise für die Dekarbonisierung von Erdgas durch Power-to-Gas werden zum Zeitpunkt der Entscheidung in einen Gaskessel nicht bzw. nicht vollumfänglich einbezogen. Der Preisimpuls kommt erst mit einer Quote für synthetisches erneuerbares Gas ab 2030, die sukzessive ansteigt. Diese wirkt sich jedoch dann nur auf die zukünftigen Wärmeversorgungswechsel aus, nicht auf die bereits getätigten Investitionen. D.h. die Ergebnisse der Szenarien lassen für sich genommen keinen Rückschluss auf einen systemisch optimalen Pfad, sondern zeigen Pfade auf, die sich aufgrund der Entscheidungskalküle, der jeweiligen politischen Rahmenbedingungen sowie der Entwicklung des Marktes und des Innovationssystems für einzelne Technologien ergeben. Eine Beurteilung der Pfade ist erst durch die Integration der Ergebnisse in die gesamtsystemische Modellierung mit Remod und Enertile möglich.

Um die Wahlentscheidungen deutlicher zu veranschaulichen, zeigen die folgenden Abbildungen die Entwicklung der Marktanteile in den Szenarien. Die Marktanteile stellen die Anzahl neu installierter Wärmeversorgungssysteme im Gebäudebestand und Neubau pro Jahr dar.

zeigt die Entwicklung der Marktanteile im Referenzszenario. Auf der linken Seite sind die gesamten Marktanteile für den Gebäudesektor, auf der rechten Seite sind die Marktanteile nach Gebäudekategorie aufgeteilt. Die empirische Grundlage für die Entscheidungskalküle bezieht sich nur auf die

selbstnutzenden Eigentümer, die in der Kategorie Ein- und Zweifamilienhäuser (EFZH) zusammengefasst sind. In der Kategorie Mehrfamilienhäuser (MFH) und Nichtwohngebäude (NWG) liegen keine empirischen Ergebnisse aus dem DCE vor. Die Integration der SLICK-Ergebnisse beeinflussen hingegen alle Gebäudekategorien. Im Referenzszenario ist der Gaskessel bis 2025 die dominierenden Technologien. Wärmepumpen gewinnen an Marktanteilen, allerdings betragen diese auch im Jahr 2045 nur 18 %.

Abbildung 15: Entwicklung der Marktanteile der Wärmeversorgungssysteme im Referenzszenario

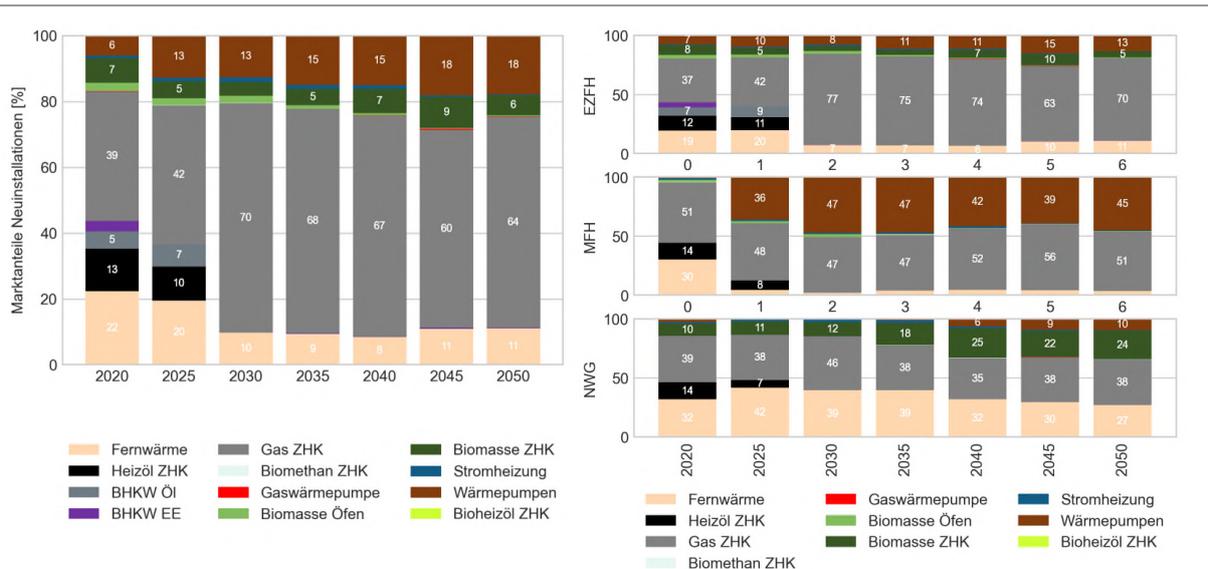
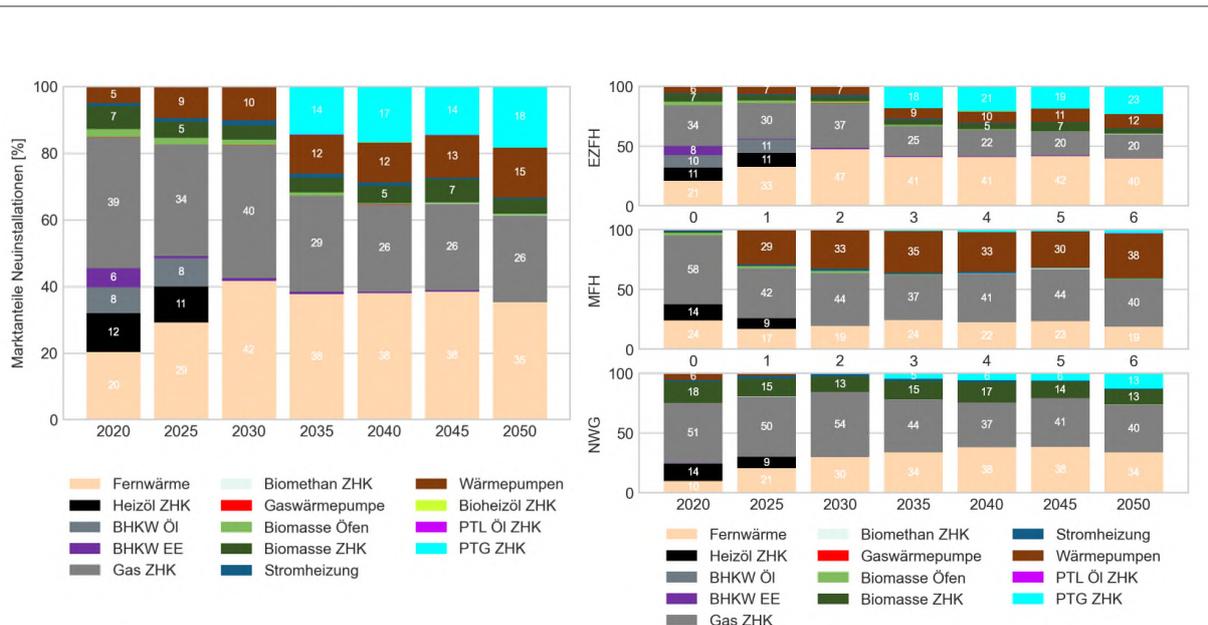


Abbildung 16 zeigt die Marktanteile im Szenario S1 Technologieoffenheit. Hier sind Power-to-Gas und Erdgas zusammen weiterhin die dominierenden Technologien, wobei aufgrund der 65 % Pflicht auch Fernwärme signifikant an Marktanteilen gewinnt.

Abbildung 16: Entwicklung der Marktanteile der Wärmeversorgungssysteme im Szenario S1-Technologieoffenheit

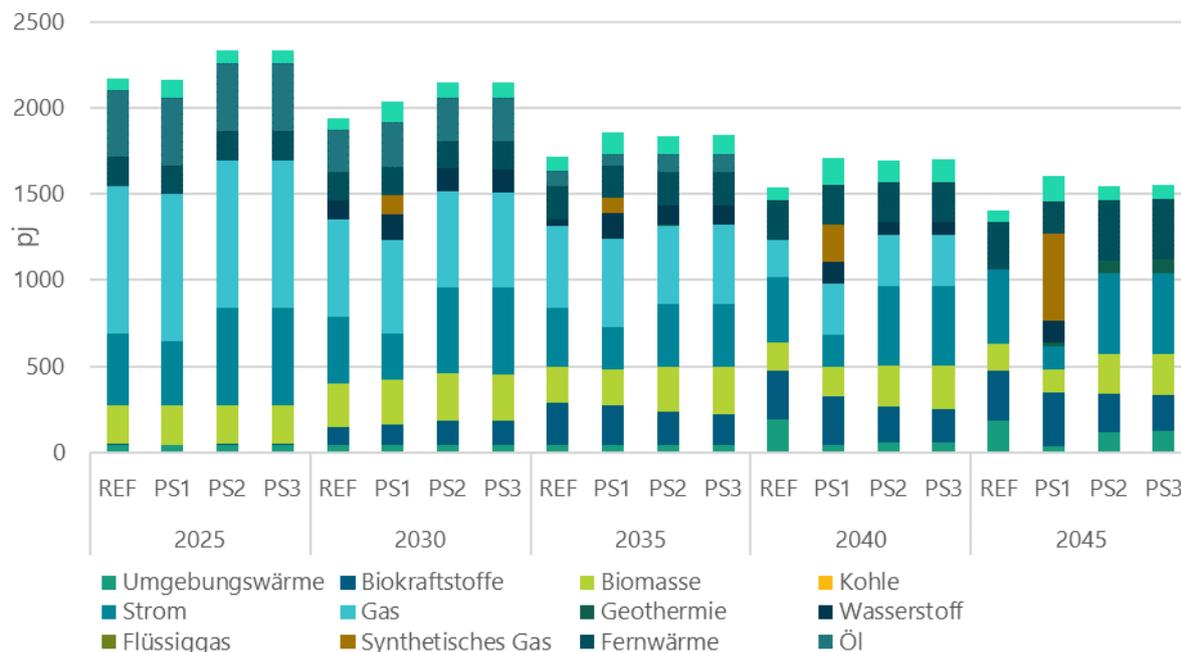


4.3.2 Modellergebnisse TAM unter Berücksichtigung von Technologiegenese und Entscheidungsverhalten

Aufgrund der hohen Disaggregation der Akteure in der Modellierung des Haushaltssektors mit den verbundenen Energieeinsätzen und Emissionen ermöglicht TAM-HH Einblicke in die Auswirkungen von Richtlinien, Innovationen in der Technologieentwicklung oder Nachfragemerkmalen, die anhand verschiedener sozioökonomischer Parameter analysiert werden können, die zur Charakterisierung des Haushaltssektors herangezogen werden. Im folgenden Abschnitt werden die Transformationspfade für Haushalte anhand dieser verschiedenen sozioökonomischen Parameter beschrieben, um die daraus gewonnenen Erkenntnisse für den gesamten Endenergieverbrauch, die Entwicklung der Treibhausgasemissionen, die Verteilung energetischer Sanierungen, die Installationsraten von Wärmepumpen und die Verteilung der Fernwärme hervorzuheben, die jeweils anhand einer anderen Charakteristik analysiert werden.

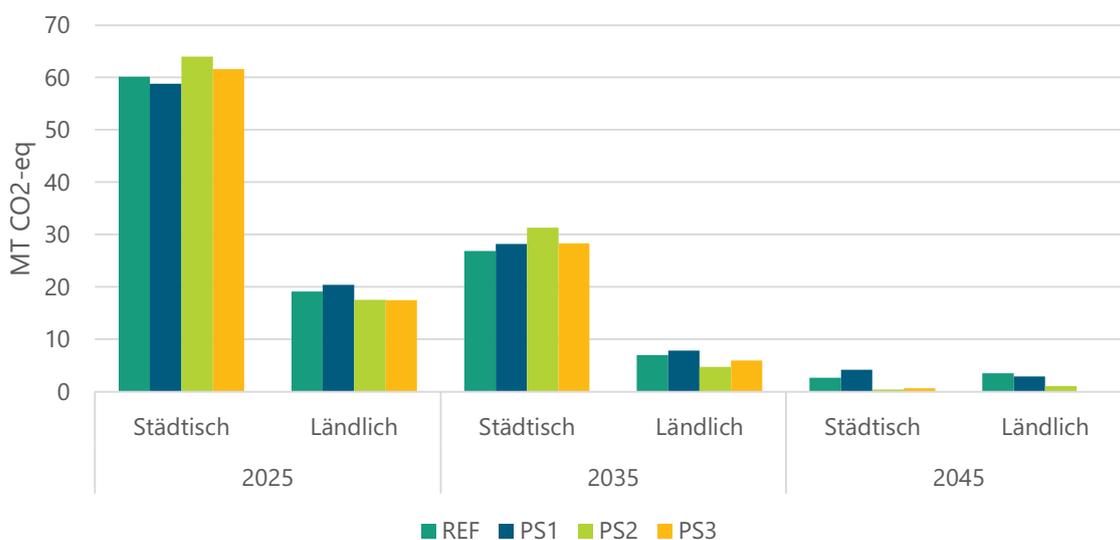
Abbildung 17 zeigt die Entwicklung des Endenergieverbrauchs im Haushaltsektor nach Szenario von 2025 bis 2045. Die Gesamtentwicklung in den drei Politikszenerarien variiert in gewissem Maße, insbesondere hinsichtlich der Dekarbonisierungsrate und des Verzichts auf Öl und Gas. Insbesondere das Szenario Technologieoffenheit (PS1) integriert in 2045 einen größeren Anteil an synthetischem Gas und Wasserstoff (der in den anderen Szenarien nicht verfügbar ist), um größere Anteile von Fernwärme und Umgebungswärmepumpen sowie den damit verbundenen Strom zu ersetzen. Aufgrund der Berücksichtigung von Budgetbeschränkungen im Modell kommt Wasserstoff ab 2030 in allen Szenarien zum Einsatz. Die Budgetbeschränkungen begrenzen das Gesamtkapital, das den verschiedenen Haushaltstypen zur Verfügung steht, und bis 2030 haben die Haushalte noch nicht genügend Kapital angespart, um die hohen Vorlaufkosten der Investitionen zu tragen, und bevorzugen daher eher alternative netzbasierte Lösungen, wie z. B. die Integration dekarbonisierter Brennstoffe in das Gasnetz. Die Nutzung des bezüglich der Brennstoffkosten teureren Wasserstoffs wird in späteren Jahren schrittweise eingestellt, da die Haushalte dann genügend Mittel für eine alternative Investition ansammeln konnten. Das Referenzszenario integriert den größten Anteil an Umgebungswärmepumpen im Jahr 2045, während in den Szenarien Innovation (PS2) und Nachfrage (PS3) Erdwärmepumpen bevorzugt werden.

Abbildung 17: Entwicklung des Endenergieverbrauchs der Haushalte nach Szenario



Die in das Energiesystem integrierten Arten von Brennstoffen und Sekundärenergieträgern zielen alle auf die Dekarbonisierung ab, beziehen aber die finanziellen und infrastrukturellen Beschränkungen des Haushaltssektors mit ein. Während die Szenarien Innovation (PS2) und Nachfrage (PS3) im Jahr 2045 weitgehend dekarbonisiert sind, weisen das Referenzszenario und das Szenario Technologieoffenheit (PS1) aufgrund der stärkeren Abhängigkeit von Bioenergieträgern immer noch einige Emissionen auf. Wie in Abbildung 8 dargestellt, emittieren städtische Gebiete aufgrund der Bevölkerungsverteilung einen größeren Anteil der Emissionen. Die Unterschiede in der Emissionsminderung variieren nicht so stark und sind auf die Art der integrierten Energieträger zurückzuführen.

Abbildung 18: Entwicklung der THG-Emissionen der Haushalte nach Szenario und Urbanisierung



Ein genauerer Blick auf den Endenergieverbrauch der Haushalte für Raumwärme und Warmwasser nach Gebäudetyp in Abbildung 9 verdeutlicht die infrastrukturellen Einschränkungen jedes Gebäudetyps. Mehrfamilienhäuser (MFH) sind in allen Szenarien stärker auf Gas, Öl und Fernwärme angewiesen, während Einfamilienhäuser (EFH) kurzfristig größere Anteile an Biomasse integrieren. Mittelfristig – wenn die meisten Heizungssysteme ihre technische Lebensdauer erreicht haben und ausgetauscht werden müssen – verlagert sich der Energieeinsatz in den MFH im Szenario Technologieoffenheit (PS1) stark auf Bioenergieträger und synthetisches Gas, während in den MFH in den anderen Szenarien einige Bioenergieträger und Fernwärme stärker integriert werden, um den Einsatz von Gas und Öl zu ersetzen. Die Wahl der Technologien bei der Analyse nach Gebäudetyp hängt weitgehend vom Preis der Technologien ab, wie er durch die Nutzung der Daten aus der Technologieinnovationsmodellierung beschrieben wird.

Abbildung 19: Entwicklung des Endenergieverbrauchs der Haushalte für Raumwärme und Warmwasser nach Szenario und Gebäudetyp

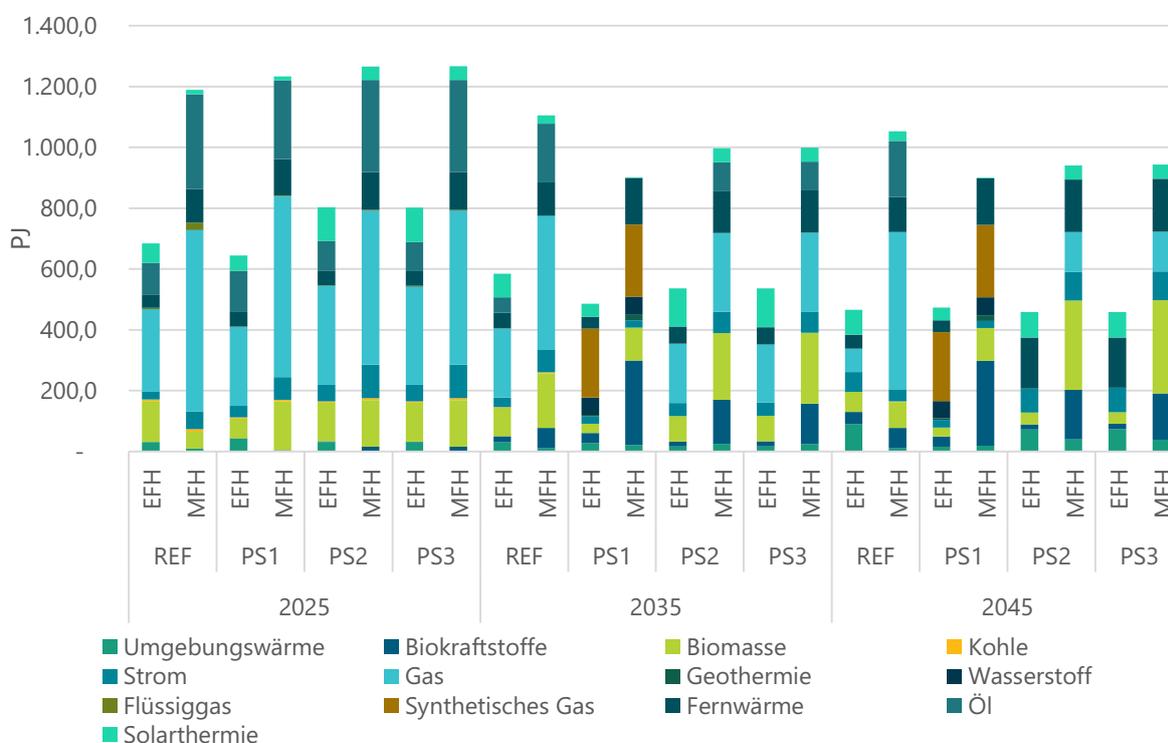


Abbildung 10 zeigt die Verteilung der Sanierung der Wohngebäude nach Einkommensgruppen, die kurzfristig stark zwischen den Szenarien variiert und danach kaum unterscheidbare Muster aufweist. Im Referenzszenario (REF) entfallen die größten Anteile an Gebäudesanierungen auf die mittleren bis oberen Einkommensgruppen, während im Szenario Technologieoffenheit (PS1) der Großteil der Renovierungen in den oberen mittleren Einkommensgruppen durchgeführt wird. In den Szenarien Innovation (PS2) und Nachfrage (PS3) dominieren die unteren mittleren Einkommensgruppen die Verteilung der Renovierungen. Sanierungen bieten eine kostengünstige Verbrauchsreduzierung, ohne dass eine unmittelbare Umstellung der Heizungsanlage erforderlich ist, und sind daher kurzfristig eine kostengünstige Alternative. Sobald ausreichend Budget für Investitionen in alternative Heizsysteme angesammelt wurde, wird die Verteilung unabhängig vom Einkommen gleichmäßig.

Abbildung 20: Energetische Sanierung der Wohngebäude nach Szenario und Einkommensgruppen

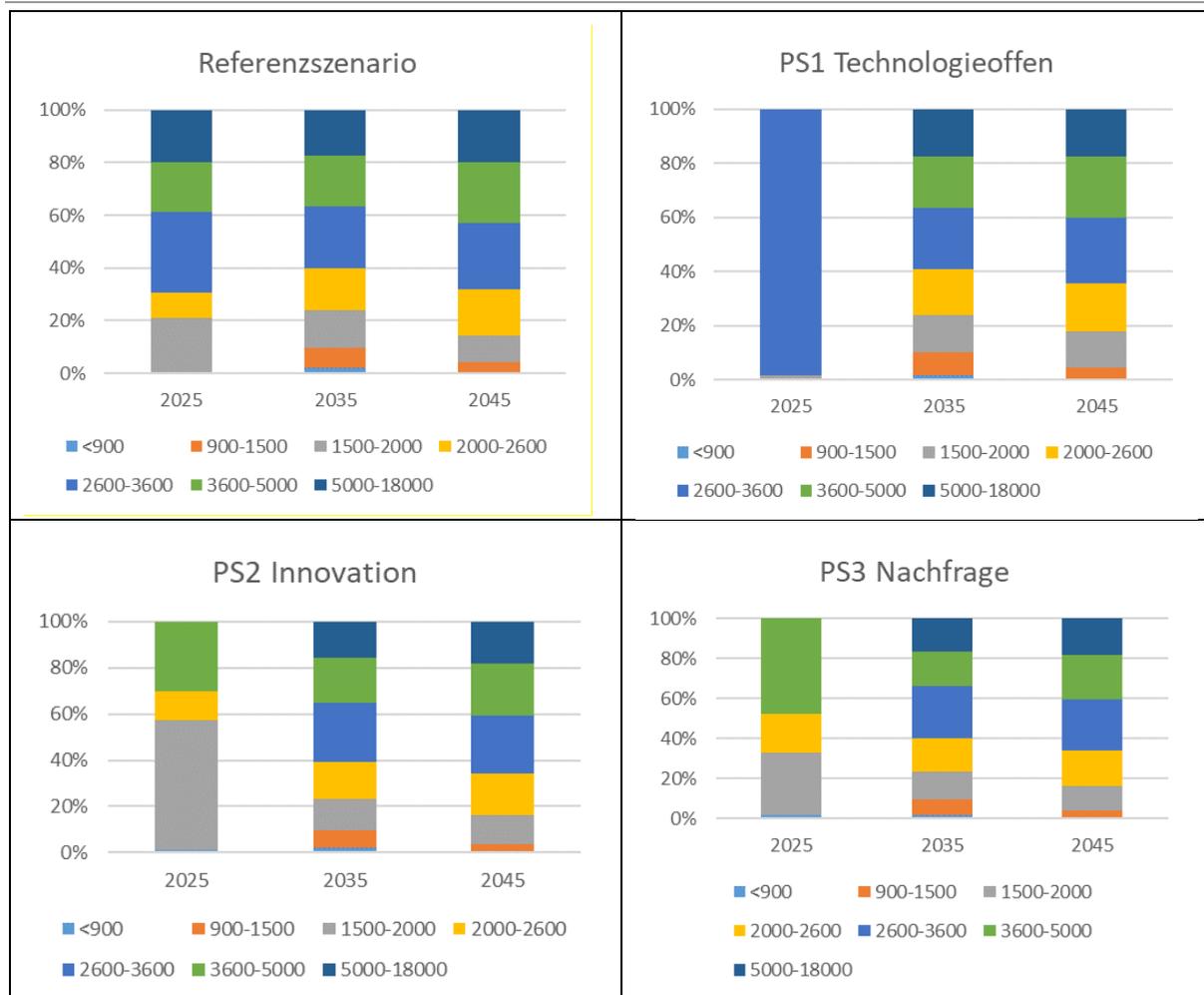
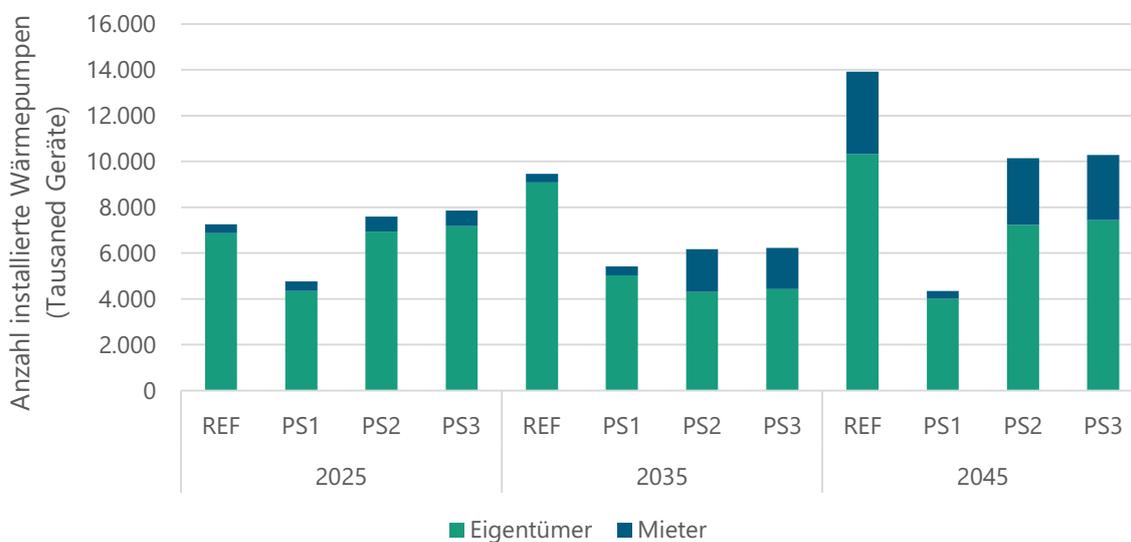


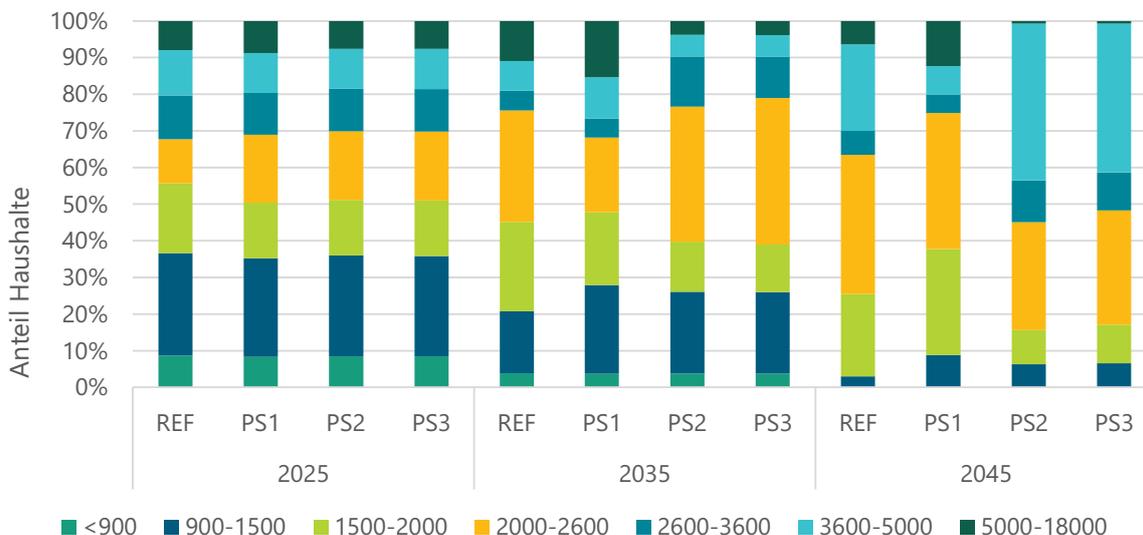
Abbildung 11 gibt einen Einblick in die Installationen von Wärmepumpen in Abhängigkeit vom Wohnverhältnis. Es überrascht nicht, dass die meisten Investitionen von Eigentümern kurz- bis mittelfristig getätigt werden, während Mieter erst auf lange Sicht Möglichkeiten an Investitionen in diese Technologie haben. Das Referenzszenario integriert die größte Anzahl installierter Wärmepumpen, während das Szenario Technologieoffenheit (PS1) aufgrund der stärkeren Integration von synthetischen Kraftstoffen, Bioenergieträgern und Wasserstoff die wenigsten installiert. Die Szenarien Innovation (PS2) und Nachfrage (PS3) weisen über alle Zeiträume hinweg ähnliche Anteile auf und nutzen in ähnlicher Weise Fernwärme und Bioenergieträger anstelle eines größeren Anteils von Wärmepumpen.

Abbildung 21: Anzahl installierter Wärmepumpen bei den Haushalten nach Szenario und Wohnverhältnis



In Abbildung 12 ist abschließend die Aufteilung des Fernwärmeverbrauchs nach Einkommensgruppen in Abhängigkeit der Szenarien dargestellt. Haushalte mit geringerem Einkommen sind in größerem Maße auf Fernwärme angewiesen, da sie in städtischen Gebieten tendenziell auf mittleren Flächen leben und sich netzbasierte Heizungslösungen im Gegensatz zu individuellen Heizungssystemen besser leisten können. Dieser Trend spiegelt auch die Eingabedaten des DCE wider, wonach Haushalte mit niedrigerem Einkommen eher bereit sind, für eine Senkung der Betriebskosten und eine Reduzierung der Emissionen zu zahlen. Auch werden Haushalte mit geringerem Einkommen von einer Erhöhung der CO₂-Steuer stärker betroffen sein, da sie sich die Umstellung auf effizientere Heizsysteme eher nicht leisten können. Daher werden Subventionen ein notwendiger Ansatzpunkt sein, um die Erschwinglichkeit der Wärmewende in allen Haushalten sicherzustellen. Die Verbindung mit den Daten aus dem Technologieinnovationsmodell werden in dieser Grafik auch dadurch deutlich, dass die teureren Technologien größtenteils von Haushalten mit höherem Einkommen genutzt werden und daher weniger auf Fernwärme zur Deckung des Basiswärmebedarfs angewiesen sind.

Abbildung 22: Verteilung Fernwärmenutzung nach Szenario und Einkommensgruppen



TAM-HHs kann angewendet werden, um die Auswirkungen politischer Maßnahmen auf verschiedene sozioökonomische Merkmale der Haushalte sowie die bebaute Umgebung zu bewerten und besser zu verstehen (Dobbins und Fahl 2023). Die in dieser Studie durchgeführte Analyse integrierte sozioökonomische Erkenntnisse zu Präferenzen wie der Zahlungsbereitschaft (DCE) sowie den Auswirkungen technologischer Innovationen und Entwicklungen auf Investitionskosten (SLICK). Diese methodischen Ergänzungen führten zu einer Analyse der Auswirkungen auf die Arten von Investitionen, die aufgrund spezifischer Einschränkungen wie dem Zugang zu Ressourcen, Netzen oder Technologien sowie der Fähigkeit, sich Investitionen zu leisten, die im Haushaltssektor getätigt werden können. Zusammen mit den übergreifenden Rahmenbedingungen, der politische Entscheidungen und Maßnahmen vorantreibt, wie z. B. der Notwendigkeit einer Dekarbonisierung bis 2045, können diese Ergebnisse die Arten von Maßnahmen (z. B. Förderung, Verbote, Anreize) unterstützen und die auf bestimmte Haushaltstypen zuschneiden (z. B. nach Einkommen, Gebäudetype, Urbanisierung).

5 Szenarienergebnisse der gesamtsystemischen Modellierung

5.1 Ergebnisse der Modellierung mit REMod

5.1.1 Rahmendaten und Szenarien

Für die Bewertung der Einflüsse des politischen Rahmens der betrachteten Szenarien auf das Gesamtsystem wird anhand ausgewählter Indikatoren ein Abgleich zu einem Vergleichsszenario, im Folgenden „S0 Optimiertes Gesamtsystem“ genannt durchgeführt. Das Vergleichsszenario ist ein Szenario, das vollständig (inklusive Heiztechnologien) optimiert wurde. Die Annahmen zu techno-ökonomischen Parametern basieren weitestgehend auf der Studie „Wege zu einem klimaneutralen Energiesystem“⁴.

Die wesentlichen Annahmen für die Untersuchungen im Rahmen von Manifold sind die Reduktion der energiebedingten Emissionen um 65% im Jahr 2030 gegenüber 1990 sowie die Einhaltung eines CO₂-Budgets von 7,8 Gt CO₂ im Zeitraum 2020 bis 2045. Des Weiteren wurde die Annahme getroffen, dass die Heizgradtage bis zum Jahr 2045 um 13% abnehmen.

Das Modell REMod wurde auf das Jahr 2020 kalibriert. Abweichungen in den Werten im Jahr 2020 sind insbesondere darauf zurückzuführen, dass für die Heiztechnologien in den Jahren 2019-2022 unterschiedliche Marktanteile in InvertEE/Lab resultieren, die in REMod übernommen wurden.

5.1.2 Notwendige Anpassung der Rahmendaten

Das Modell REMod findet die kostenoptimale Lösung der Transformation des Energiesystems unter Einhaltung der oben genannten CO₂-Restriktionen. Zusätzlich werden Potenzialgrenzen für den Zubau von Technologien wie beispielsweise Wind und PV, eine Bandbreite der Sanierungsrate oder die Verwendung von Energieträgern wie Biomasse oder dem Import von synthetischen Energieträgern vorgegeben. Für die Modellierung der Politikszenerarien zeigt sich, dass unter den Standardannahmen das Modell keine mögliche Lösung findet, da die Marktanteile der Heiztechnologien fest vorgegeben werden, die öl-, gas- und biomassebasierte Heizsysteme in das System zwingen. Dieses Problem wurde adressiert, indem das Potenzial der Importmengen von synthetischem Erdgas (SynGas) sowie das Biomassepotenzial erhöht wurde. Die Annahmen hierzu sind in Tabelle 9 dargestellt. Dabei stellen die unten aufgeführten Energieträgermengen diejenigen da, die in einer sukzessiven Erhöhung der Mengen als diejenigen resultierten, die zu einem lösbaren Ergebnis führten. Ausgangspunkt hierbei sind die Werte von S0. Für das Jahr 2045 wurde in 25 TWh Schritten getestet, ob eine Lösung generiert werden kann.

Tabelle 9: Annahmen zur Verwendung einzelner Energieträger im Jahr 2045

Szenario	H2-Import	Syn-Gas Import	Biomassepotenzial
S0 Optimiertes Gesamtsystem	200 TWh	0 TWh	131 TWh

⁴ Studie: Wege zu einem klimaneutralen Energiesystem – Die deutsche Energiewende im Kontext gesellschaftlicher Verhaltensweisen - Fraunhofer ISE

Szenario	H2-Import	Syn-Gas Import	Biomassepotenzial
S1 Technologieoffen	230 TWh	160 TWh	150 TWh
S2 Fokus Innovation	250 TWh	160 TWh	150 TWh
S3 Fokus Nachfrage	250 TWh	160 TWh	150 TWh

Quelle: Fraunhofer ISE

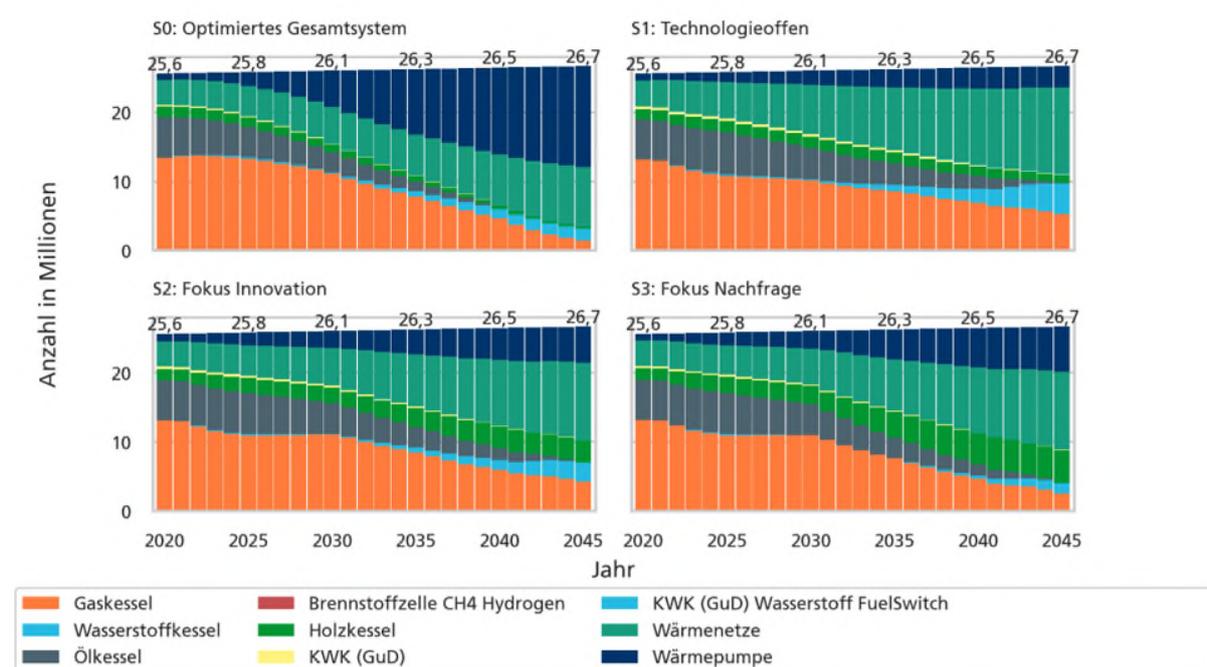
5.1.3 Ergebnisse

Im Folgenden werden die Ergebnisse der vier betrachteten Szenarien anhand wesentlicher Ergebnisindikatoren ausgewertet.

Heiztechnologien

Die Marktanteile der Heiztechnologien wurden für die drei Politiksznarien (S1-S3) als Parameter vorgegeben und nicht optimiert, wie im Vergleichsszenario (S0 Optimiertes Gesamtsystem). Damit stellen, die in Abbildung 23 dargestellten Heiztechnologien kein REMod Modellergebnis dar (S1-S3). Der Vergleich zum optimierten Szenario (S0) zeigt deutliche Abweichungen zwischen dem kostenoptimalen Pfad und dem bottom-up simulierten Ausbaupfad der Heiztechnologien. Im Jahr 2045 setzt sich der Heiztechnologiebestand zum Großteil aus Wärmepumpen (55%) und Fernwärme (33%) zusammen. Im optimalen Szenario findet eine sukzessive Substitution von Öl- Gas- und Biokesseln durch Wärmepumpen und Fernwärme und zu geringen Anteilen H2-Ready Heizkesseln statt. Biomasse geht auf einen Anteil <1% zurück und es verbleiben lediglich 12 % an Gas bzw. H2-Kesseln. Im Vergleich werden in den Politiksznarien zunächst Ölkessel zugebaut. Insbesondere im Technologieoffenen Szenario nimmt Fernwärme (47%) zusammen mit gasbasierten Systemen (Syn-Gas bzw. H2) eine zentrale Rolle ein (37%). Im Nachfrageszenario ist die Rolle von Biomasse zwischen allen Szenarien am ausgeprägtesten (17%).

Abbildung 23: Entwicklung des Heizsystembestands in den betrachteten Szenarien

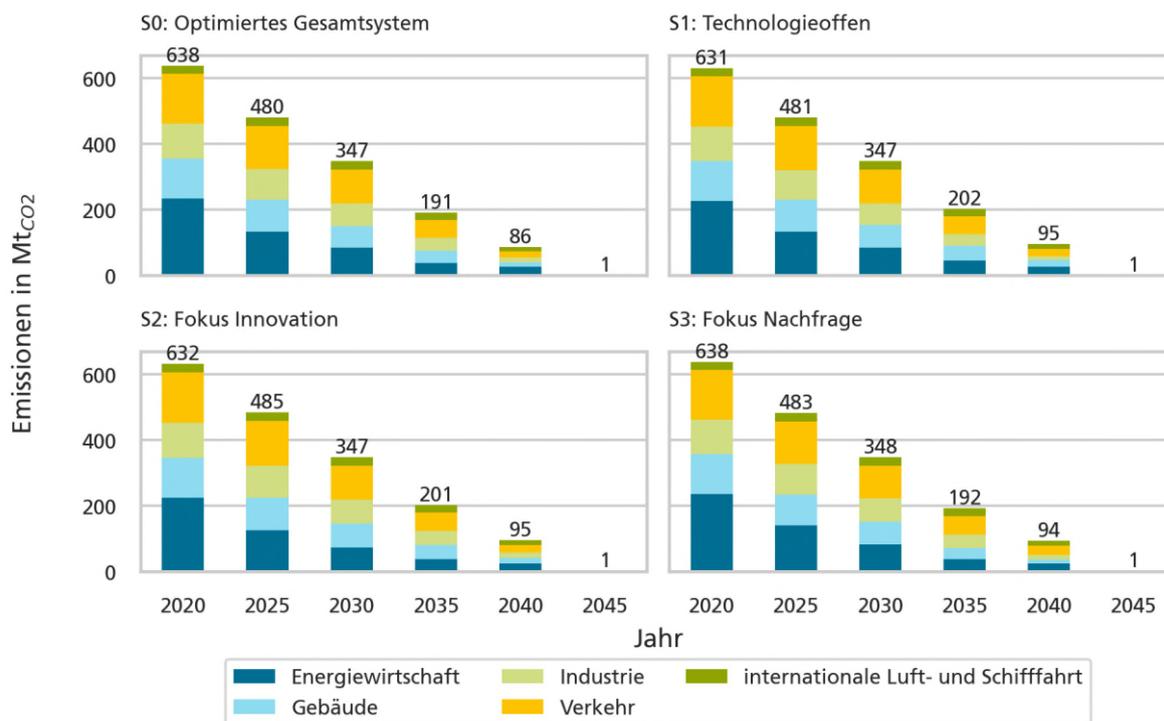


Quelle: Fraunhofer ISE

THG-Emissionen

Bedingt durch die Vorgaben im Modell wird in allen Szenarien die Treibhausgasneutralität bis zum Jahr 2045 erreicht. Der deutlichste Emissionsrückgang bis zum Jahr 2030 ist auf die Energiewirtschaft zurückzuführen. Zwischen den Szenarien zeigen sich insgesamt keine deutlichen Abweichungen. Der Gebäudesektor erreicht im Vergleichsszenario im Rahmen der Modellunsicherheiten das KSG-Sektorenziel im Jahr 2030. In den Politiksznarien hingegen liegen die Treibhausgasemissionen oberhalb des Ziels von 66,7 Mt CO₂ äq. Hierbei ist die Lücke mit knapp 6 Mt CO₂-äq. im Technologieoffenen Szenario am größten. Der Verkehrssektor überschreitet die Ziele in allen Szenarien deutlich. Im Jahr 2030 wird das derzeit aktuelle Sektorenziel von 84,7 Mt CO₂ äq. um knapp 18 Mt CO₂ äq. überschritten. Die Abweichung zwischen den Szenarien sind hierbei wenig stark ausgeprägt.

Abbildung 24: Energiebedingte CO₂-Emissionen in den einzelnen Sektoren



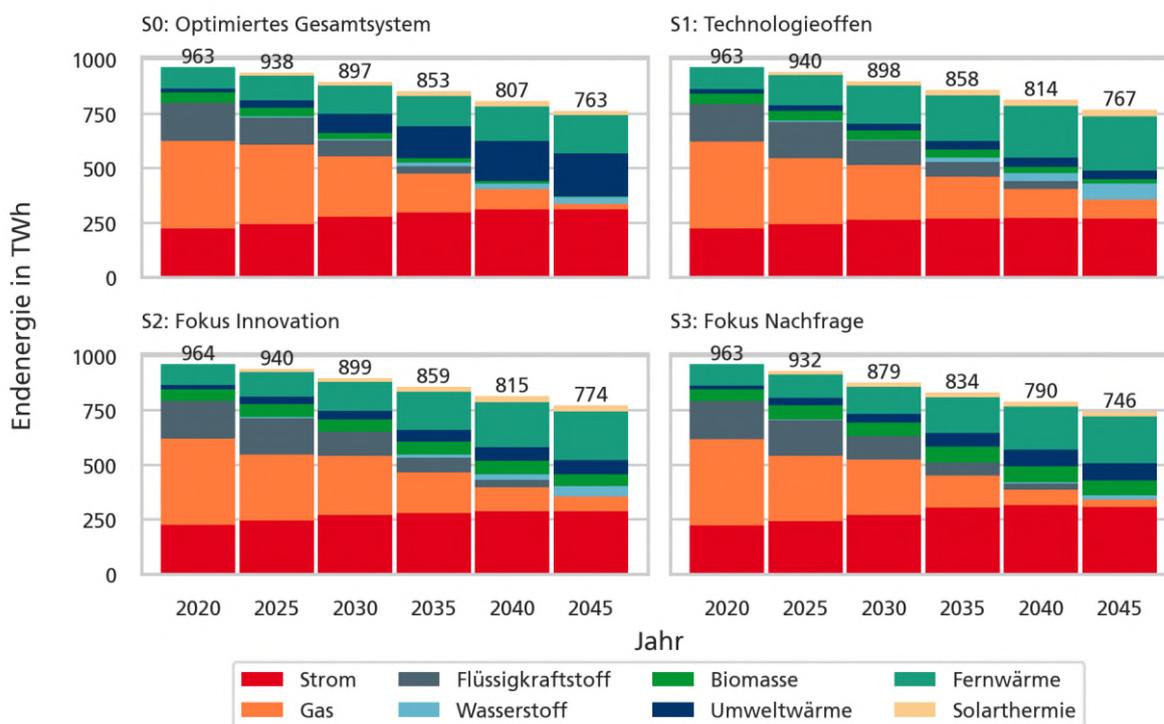
Quelle: Fraunhofer ISE

Endenergie

Abbildung 25 stellt die Endenergie im Gebäudesektor dar. In allen Szenarien zeigt sich, dass sich die Endenergienachfrage deutlich um rund 20% zwischen 2020 und 2045 reduziert. Dies ist auf den Heiztechnologiewechsel, sowie die Sanierung der Gebäude zurückzuführen. Beides unterscheidet sich zwischen den Szenarien, wie auch die nachfolgenden Graphiken zeigen. Zudem ist die Verwendung von Fernwärme von zentraler Bedeutung. Der Anteil der Fernwärmenutzung liegt im optimierten Szenario bei 23% und in den Politiksznarien bei allen bei ca. 30%. Solarthermie hat in allen Szenarien einen eher geringen Anteil von 3-4% der Endenergienutzung in 2045.

Abbildung 25: Endenergienachfrage im Gebäudesektor

Strom enthält sowohl den Strom für Wärmepumpen als auch die Strombasislast für Haushaltsgeräte, Beleuchtung etc.



Quelle: Fraunhofer ISE

Deutliche Unterschiede zwischen den Szenarien zeigen sind in folgenden Aspekten:

- Die Nutzung von Wärmepumpen ist in dem optimierten Gesamtsystem von hoher Relevanz (rund 200 TWh Umweltwärme in 2045). Unter Berücksichtigung des Akteursverhaltens zeigen die drei Politikszenerien eine deutliche Verschiebung der Endenergienutzung. Im Nachfrageszenario werden 80 TWh in 2045, im Innovationsszenario 65 TWh und im Technologieoffenen Szenario 38 TWh Umweltwärme im Jahr 2045 verwendet.
- Die Verwendung von Gas und Wasserstoff durch H2-ready Heizkessel bzw. eine Beimischung von Wasserstoff im Erdgasnetz ist im Technologieoffenen Szenario am deutlichsten ausgeprägt (160 TWh in 2045), während im optimierten Szenario und im Nachfrage Szenario der Anteil von Gas und Wasserstoff bei 7% in 2045 liegt, ist dieser im Innovationsszenario bei 15% und im Technologieoffenen Szenario bei 21%.
- Die Nutzung von Biomasse ist im optimierten Szenario mit einem Anteil von 1% vernachlässigbar, während bei nicht optimaler bzw. angehobenem Potenzial die Biomasseverwendung im Technologieoffenen bei 3% im Innovationsszenario bei 7% und im Nachfrageszenario bei 7% liegt.

Energetische Gebäudesanierung

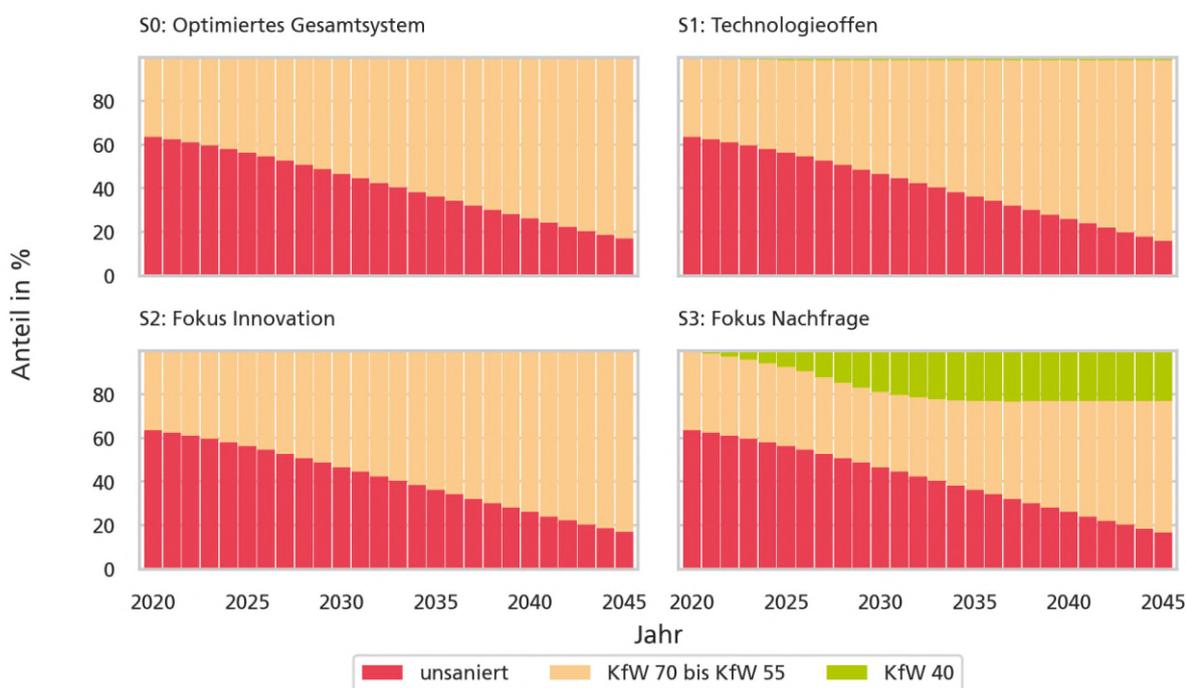
Das Modell REMod optimiert modellendogen die Verbesserung des energetischen Gebäudezustands. Hierbei können zwischen zwei verschiedenen Sanierungsniveaus unterschieden werden.

Grundlage dieser Sanierungsstandards ist, dass mit dem ersten Sanierungspaket 50% des Wärmebedarfs gegenüber dem Zustand vor der Sanierung reduziert wird und mit dem zweiten 64% des Wärmebedarfs. Die Sanierungspakete können annäherungsweise mit folgenden gebräuchlichen Sanierungsstandards übersetzt werden.

- Reduktion des Wärmebedarfs um 50%: Anlehnung an das Neubauniveau der EnEV 2016 entspricht in etwa KfW 70 bis 55 (letzteres mittelfristig).
- Reduktion des Wärmebedarfs um 64%: entspricht in etwa dem Passivhausstandard bzw. dem KfW 40 Standard.

Aus Abbildung 26 geht hervor, dass der Anteil unsanierter Gebäude bis zum Jahr 2045 in nahezu identischem Verlauf von heute knapp 65% auf 16% im Jahr 2045 absinkt, sodass die Qualität der Gebäude deutlich steigt. Hiermit wird in allen Szenarien die maximal angenommene Sanierungsrate, jedoch nicht die Sanierungstiefe ausgeschöpft. Auffällig ist, dass in dem Nachfrageszenario bis zum Jahr 2033 das ambitionierte Sanierungsniveau KfW 40 als Teil der Lösung resultiert. Dies ist darauf zurückzuführen, dass das System keine anderen kostengünstigeren Optionen zur Dekarbonisierung zur Verfügung hat und damit die vergleichsweise teure Option der ambitionierten Sanierung nutzt. Wesentlicher Treiber hierfür ist das Erreichen des sektorübergreifenden Reduktionsziels im Jahr 2030 von -65% ggü. 1990. Der geringere Endenergieverbrauch in diesem Szenario ist auch in Abbildung 25 verdeutlicht.

Abbildung 26: Energetische Sanierung der Gebäude



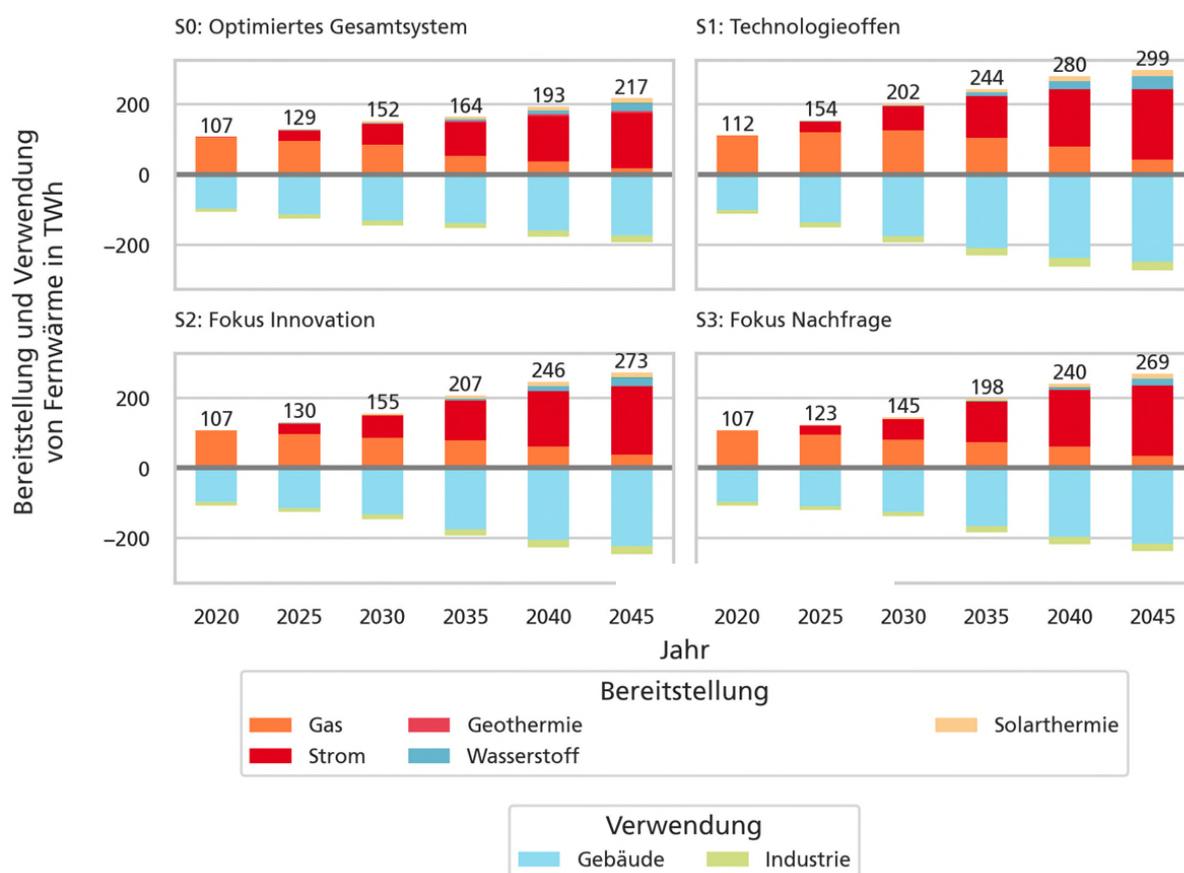
Quelle: Fraunhofer ISE

Fernwärme

Wie bereits beschrieben spielt die Fernwärme in den Politikszenerarien eine große Rolle. Abbildung 27 stellt die Bereitstellung und Verwendung von Fernwärme in den Szenarien dar. Der Fernwärmebedarf in 2045 ist im Technologieoffenen Szenario am größten (ca. 80 TWh höher als im optimierten

Szenario), aber auch in den beiden anderen Szenarien steigt der Fernwärmebedarf um rund 50 TWh). Die Fernwärmebereitstellung erfolgt in allen Szenarien von derzeit gasbasierten Erzeugungssystemen zunehmend durch Strom (Wärmepumpen). Im Jahr 2045 spielen Gas und Wasserstoff eine untergeordnete Rolle. Solarthermie leistet einen geringen Anteil zur Fernwärmebereitstellung. Der Anteil an gasförmigen Energieträgern im Jahr 2045 liegt jedoch im optimierten Szenario und dem Nachfrageszenario rund 19% deutlich niedriger als im Technologieoffenen Szenario mit 26% und dem Innovationsszenario mit 22%. Im Technologieoffenen Szenario erfolgt bis zum Jahr 2030 sogar noch ein Zubau an gasbasierter Fernwärmeerzeugung. In allen Szenarien fließt der Hauptteil der Fernwärme in den Gebäudesektor und nur geringe Mengen in den Industriesektor.

Abbildung 27: Bereitstellung und Verwendung von Fernwärme in den Szenarien in REMod



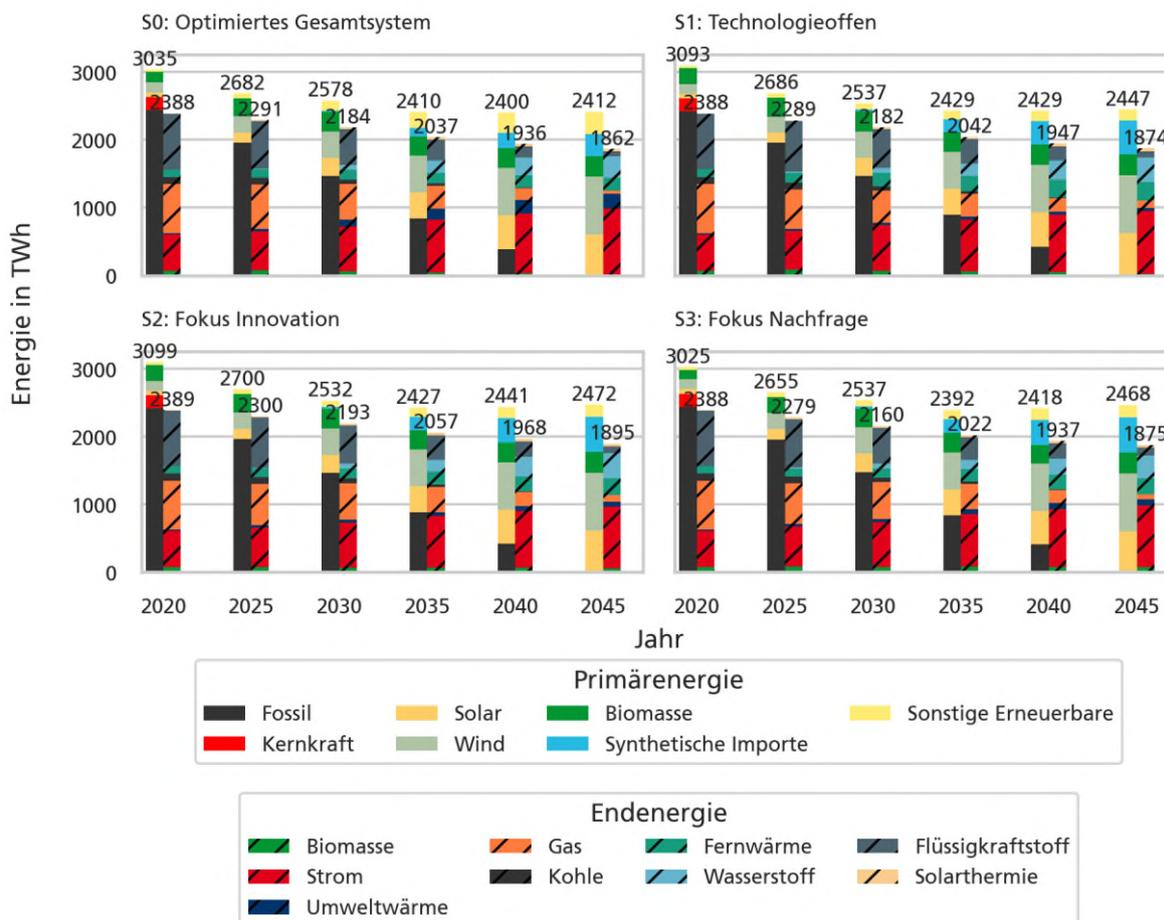
Quelle: Fraunhofer ISE

Energieträger

Abbildung 28 zeigt den Einsatz von Primär- und Endenergie in den betrachteten Szenarien. In allen Szenarien wird der heute dominierende Anteil an fossilen Energieträgern durch erneuerbare Energieträger vollständig ersetzt. In dem heutigen System sind ca. 80% der Primärenergie in Form von Endenergie nutzbar. Es zeigt sich, dass der Bedarf an Primärenergie deutlich reduziert werden kann. Dies liegt unter anderem an der Verwendung effizienterer Systeme wie der Wärmepumpe. Es zeigt sich zudem ein Fuel Switch bei welchem fossilen Energieträger (Öl, Kohle, Gas) durch erneuerbare Energieträger wie Wind und Photovoltaik sowie die Nutzung von synthetischen Energieträgern er-

setzt werden. Unter Berücksichtigung von Akteursverhalten im Gebäudesektor in den Politikszenerien zeigt sich, dass die resultierenden Gesamtsysteme höhere Primär- und Endenergiebedarfe aufweisen.

Abbildung 28: Primär und Endenergie in den Szenarien



Quelle: Fraunhofer ISE

Während Strom im heutigen System einen Anteil von ca. 22% an der Endenergie ausmacht, steigt der Elektrifizierungsgrad im optimierten Szenario deutlich auf über 50%. In den durch Akteursverhalten durch Politikmaßnahmen getriebenen Systemen im Gebäudesektor liegt der Elektrifizierungsanteil der Endenergie leicht unter 50% (siehe Tabelle 10). Die detaillierten Verschiebungen sind der Tabelle zu entnehmen.

Tabelle 10: Anteile der Endenergieträger im heutigen System und in den unterschiedlichen Szenarien

Szenario	Heutiges System	S0 Optimiertes Gesamtsystem (2045)	S1 Technologieoffen (2045)	S2 Fokus Innovation (2045)	S3 Fokus Nachfrage (2045)
Endenergie Biomasse	3%	0,3%	1,2%	3,2%	4,0%
Endenergie Fernwärme	4%	10,4%	14,6%	12,9%	12,6%
Endenergie Flüssigkraftstoff	35%	3,8%	4,5%	5,0%	6,5%
Endenergie Gas	30%	2,6%	6,0%	5,3%	4,2%
Endenergie Kohle	4%	0%	0%	0 %	0%
Endenergie Solarthermie	0%	1,8%	2,5%	2,3%	1,9%
Endenergie Strom	22%	52,5%	49,5%	47,9%	48,6%
Endenergie Umweltwärme	1%	11,7%	2,2%	3,8%	4,7%
Endenergie Wasserstoff	0%	16,9%	19,5%	19,6%	17,6%

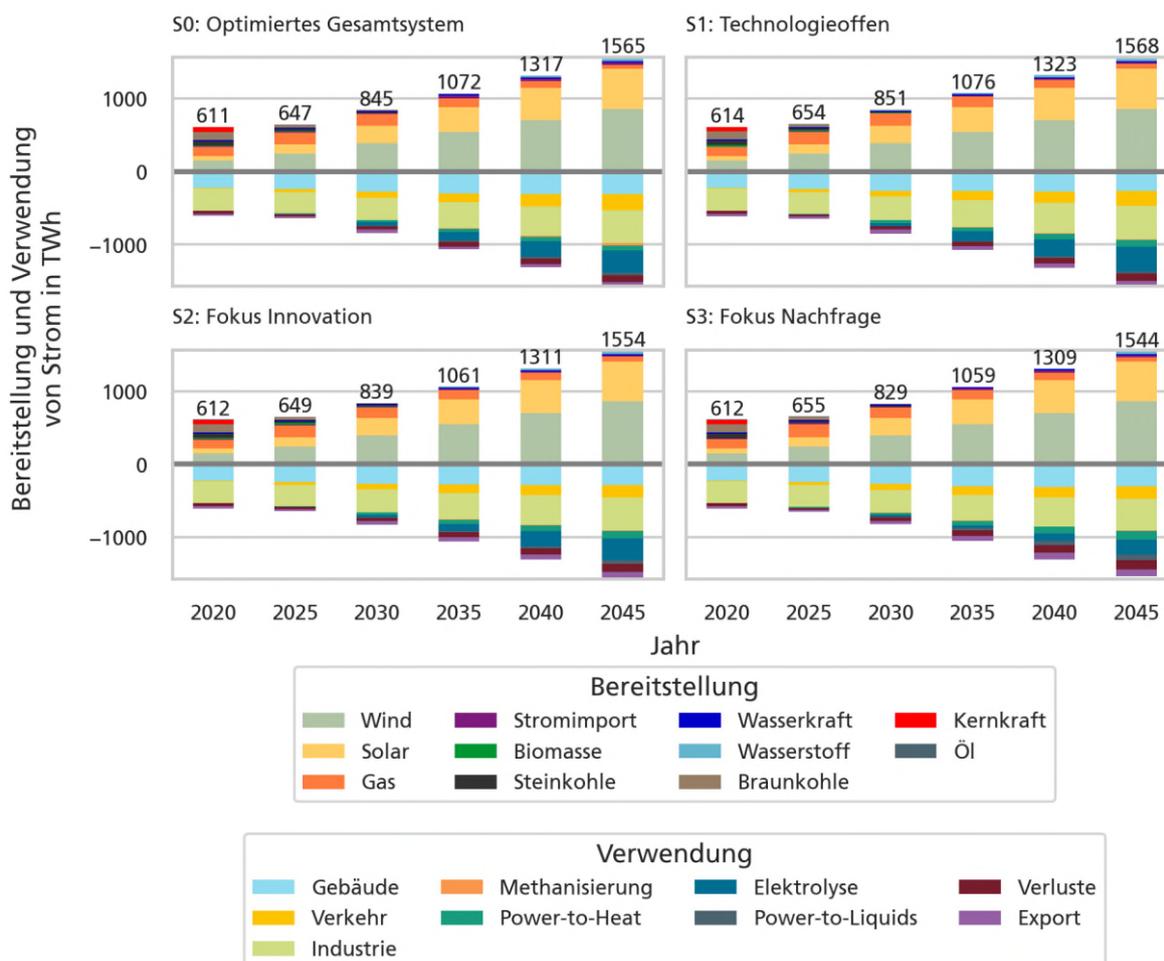
Quelle: Fraunhofer ISE

Die Erzeugung und Verwendung von Strom, als dominanter Energieträger in den Zukunftsszenarien ist in Abbildung 29 dargestellt. In allen Szenarien wird das maximale angenommene Ausbaupotenzial erneuerbarer Energieträger von insgesamt 845 GW ausgereizt. Windkraft und Photovoltaikstrom sind hierbei die wesentlichen Erzeugungstechnologien der Stromversorgung und werden sehr stark ausgebaut (Wind in 2045 850 TWh, Solar 550 TWh). Zwischen den Szenarien zeigen sich leichte Verschiebungen:

- Die Verwendung von Strom zur Erzeugung von Wasserstoff durch Elektrolyse ist im Nachfrageszenario deutlich geringer (100 TWh niedriger als in den anderen Szenarien) (200 anstatt 300 TWh).
- Im Innovations- und Technologieoffenen Szenario wird im Jahr 2045 ca. 50 TWh weniger Strom im Gebäudesektor verwendet.

- Die Elektrifizierung ist in den Politikszenerarien im Verkehrssektor ca. 50 TWh geringer als im Vergleichsszenario, während der Elektrifizierungsgrad im Industriesektor eher geringe Abweichungen zwischen den Szenarien aufweist.

Abbildung 29: Bereitstellung und Verwendung von Strom

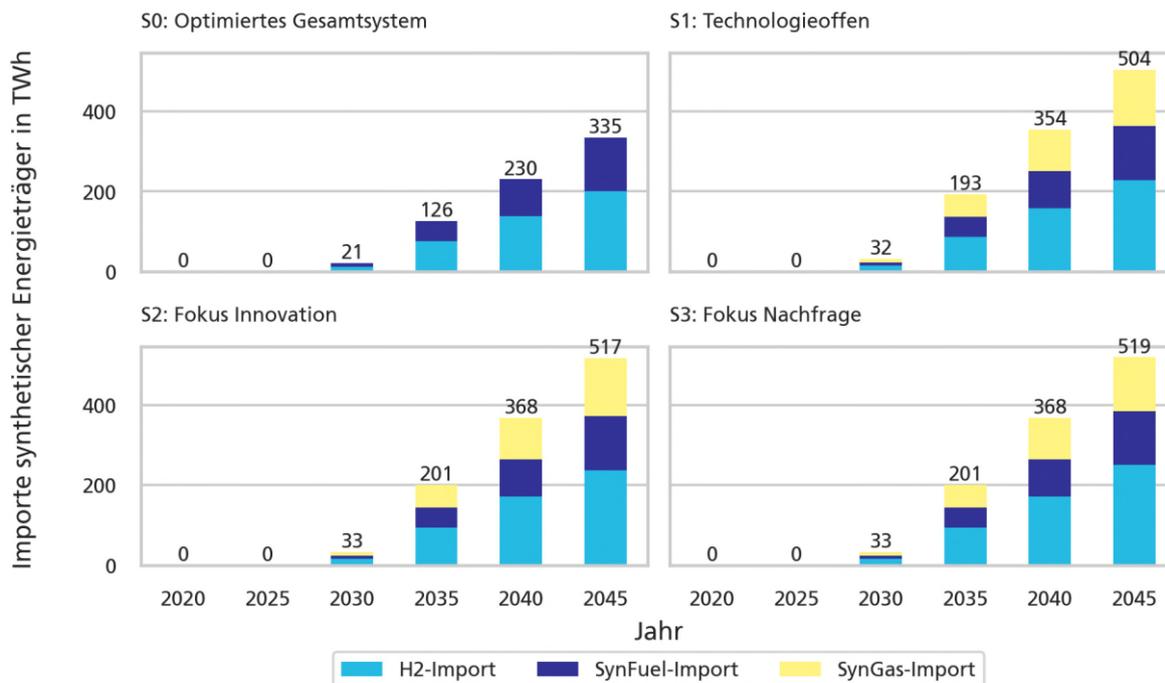


Quelle: Fraunhofer ISE

Deutliche Unterschiede zwischen den Szenarien zeigen sich bei der Bereitstellung und Verwendung heimischer und importierter synthetischer Energieträger. Hierbei ist noch einmal darauf hingewiesen, dass die Annahmen zum maximalen Potenzial des Imports der Energieträger zwischen den Szenarien angepasst wurden, um eine gültige Modelllösung zu generieren (siehe Kapitel 5.1.2). Abbildung 30 zeigt die Importmengen der unterschiedlichen synthetischen Energieträger. Der Import von synthetischen flüssigen Energieträgern ist in den Szenarien gleich. Deutliche Unterschiede zeigen sich hier bei den Importmengen von synthetischem Erdgas. Die Politikszenerarien würden ohne die Importe zu keiner gültigen Lösung führen. Das angenommene synthetische Erdgas Potenzial von 160 TWh in den drei Politikszenerarien wird nicht vollständig ausgeschöpft (140 TWh in S1, 146 TWh in S2 und 135 TWh in S3 im Jahr 2045). Zudem sind die Importmengen von Wasserstoff höher als in dem optimierten Vergleichsszenario (in welchem die heimische Produktion jedoch höher ist). Die Realisierbarkeit dieser Importmengen zusätzlich zu Wasserstoff und synthetischen Flüssigkraftstoffen ist mit sehr großer Unsicherheit verbunden. Da dies das Potenzial sowie den Willen zu Partnerschaften in außereuropäischen Ländern voraussetzt.

Abbildung 30: Importe synthetischer Energieträger in den Szenarien

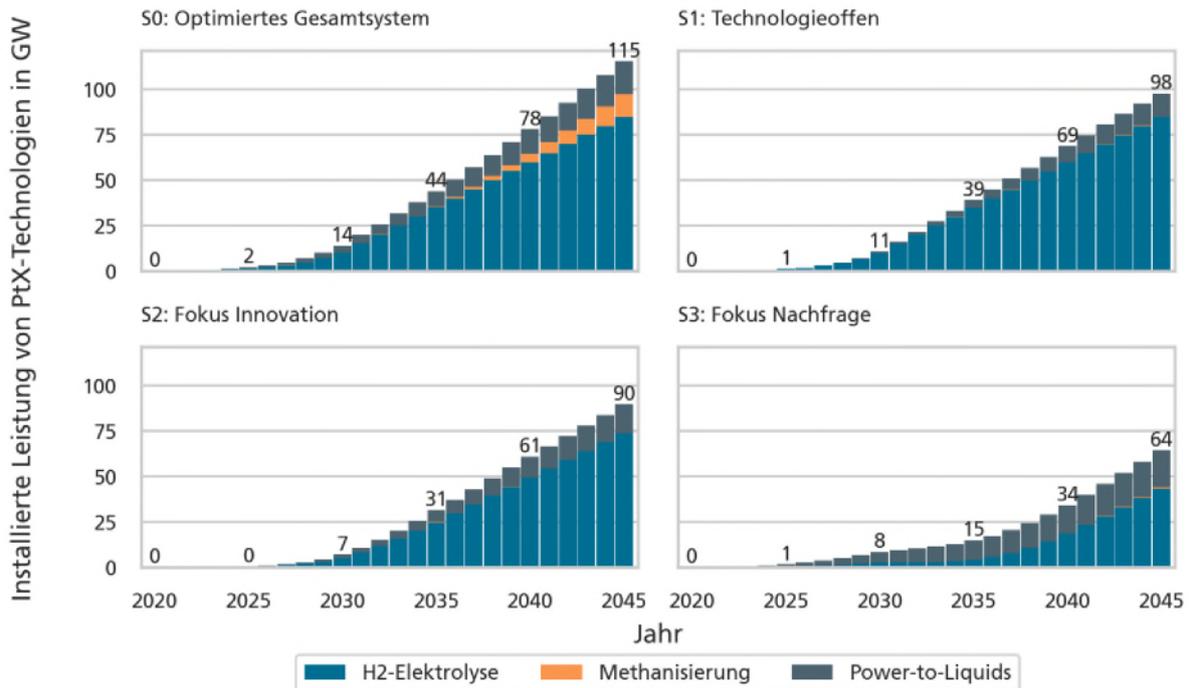
Das maximale Potenzial wurde in den Szenarien gemäß den Annahmen aus Kapitel 5.1.2 angepasst und variiert damit zwischen den Szenarien.



Quelle: Fraunhofer ISE

Es zeigt sich zudem zwischen den Szenarien ein deutlicher Unterschied in der heimischen Erzeugung synthetischer Energieträger (Abbildung 31). Die installierte Leistung der heimischen Wasserstoffherzeugung liegt mit Ausnahme des Nachfrageszenarios mit knapp 40 GW bei 74-84 GW in 2045. Insgesamt ist die heimische Erzeugung synthetischer Energieträger im Vergleichsszenario höher, was mit den unterschiedlichen Annahmen zur Biomasseverwendung und den Importmengen von Wasserstoff und synthetischem Erdgas zusammenhängt. Auffällig ist die deutlich reduzierte heimische Erzeugung im Nachfrageszenario.

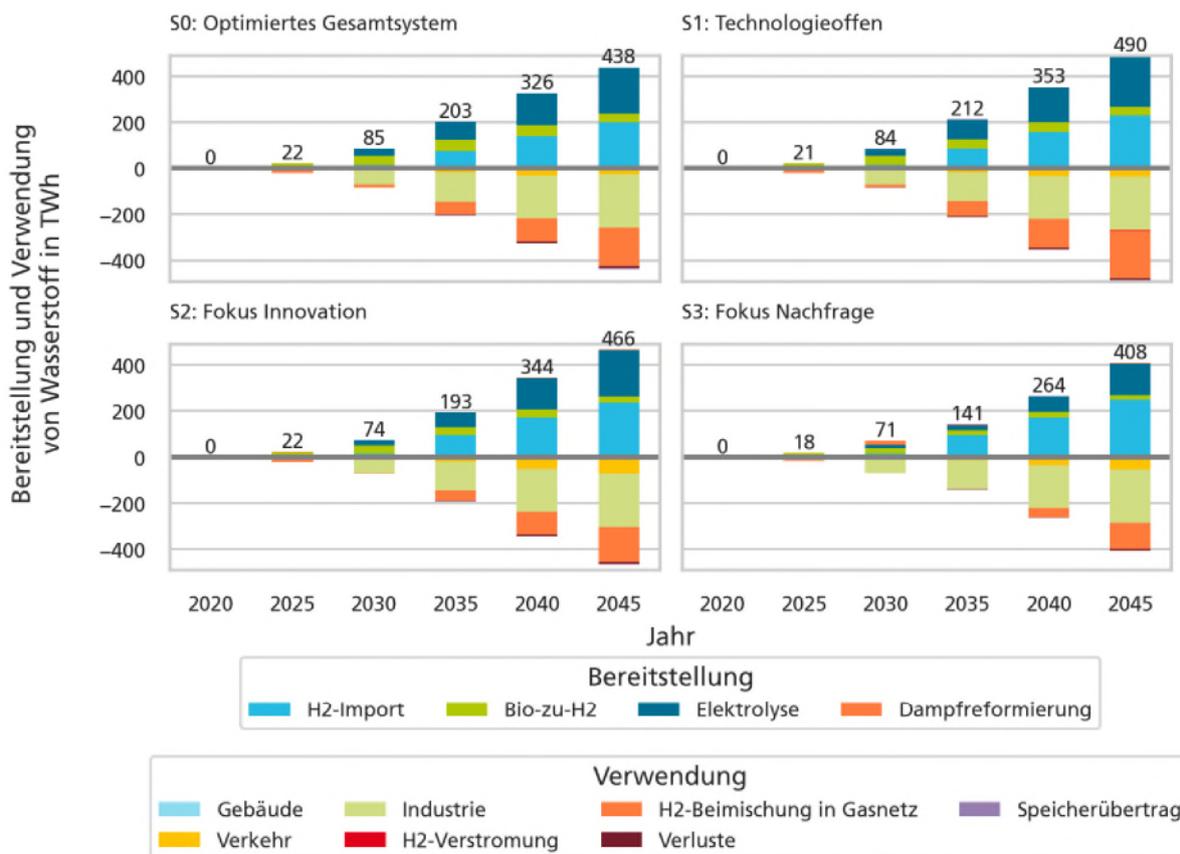
Abbildung 31: Heimische installierte Leistung von Power-2-X Technologien



Quelle: Fraunhofer ISE

Insgesamt zeigt sich in Abbildung 32, dass im technologieoffenen Szenario der Wasserstoffbedarf am größten ist (ca. 50 TWh höher als im Vergleichsszenario). Im Nachfrageszenario jedoch niedrigere Wasserstoffmengen verwendet werden. Im Gebäudesektor wird Wasserstoff nicht direkt verwendet. Über die Beimischungen ins Erdgasnetz findet Wasserstoff jedoch indirekt im Gebäudesektor Verwendung. Die Beimischung von Wasserstoff in das Erdgasnetz (siehe auch Abbildung 33) ist im technologieoffenen Szenario mit rund 200 TWh am größten. Im Vergleichsszenario sowie im Innovationsszenario werden 150-160 TWh beigemischt und im Nachfrageszenario 115 TWh. Zur Deckung von Feedstocks (200 TWh) sowie als Energieträger (50 TWh) wird Wasserstoff zum Großteil in der Industrie genutzt.

Abbildung 32: Bereitstellung und Verwendung von Wasserstoff



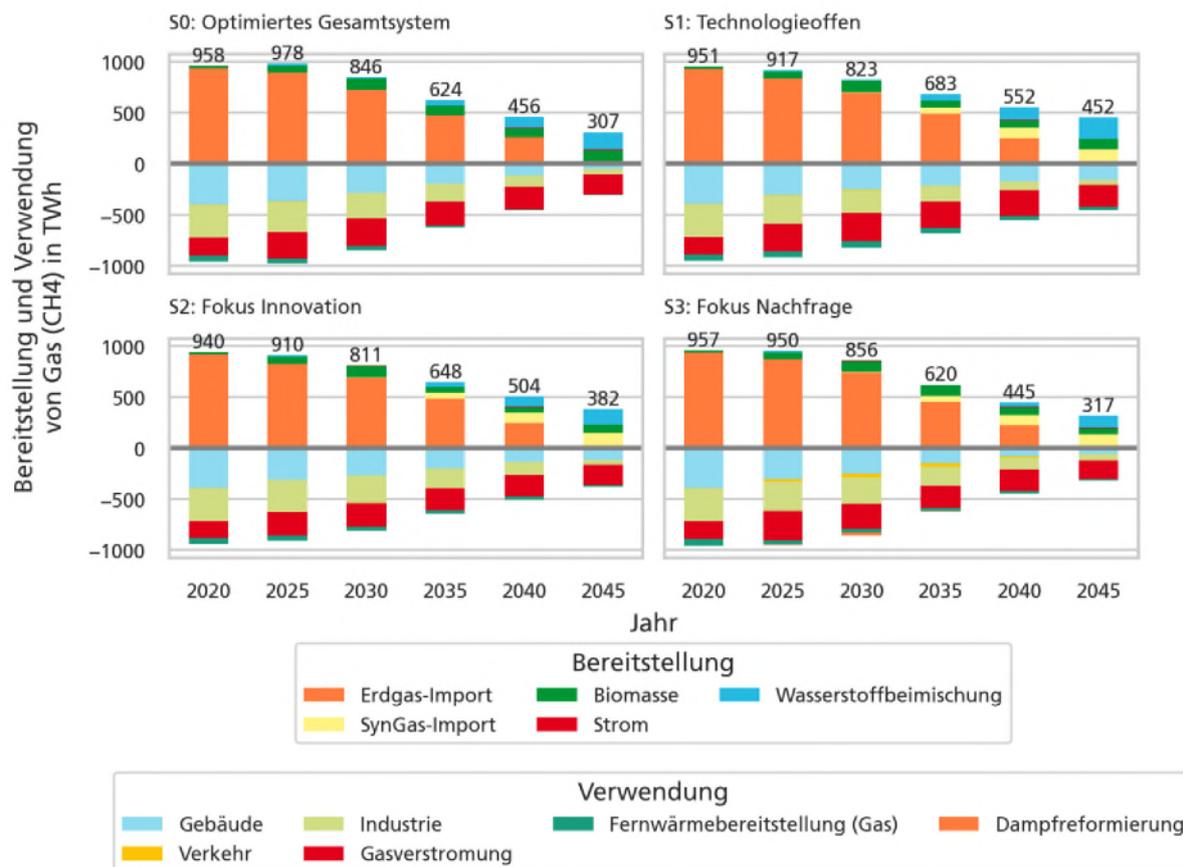
Quelle: Fraunhofer ISE

In allen Politikszensarien wird mehr fossiles oder erneuerbares Gas verwendet als im Vergleichsszenario, wie aus Abbildung 33 hervorgeht. Im Innovationsszenario ist in 2045 die Verwendung von Gas um 24% höher als im Vergleichsszenario, die Abweichung im Nachfrageszenario ist gering. Deutlich wird aus der Graphik, dass die Bereitstellung des Gases unterschiedlich ist. Im Vergleichsszenario sind die Hauptenergieträger Wasserstoff über eine Beimischung im Gasnetz (54%)⁵ und Biogas (41%). In den Politikszensarien kommt weniger Biomasse zur Biogasbereitstellung zum Einsatz. Im technologieoffenen Szenario wird mehr Wasserstoff sowie Importe synthetischen Erdgases verwendet. Im Innovations- und im Nachfrageszenario wird weniger Wasserstoffbeimischung dafür jedoch deutlich mehr synthetisches Erdgas verwendet.

Hervorzuheben ist, dass im Vergleichsszenario und im Nachfrageszenario lediglich 50 TWh des Gases in 2045 im Gebäudesektor verwendet werden. Im Technologieszenario liegt die Verwendung von Gasen ca. bei einem dreimal so hohen Wert (150 TWh), im Innovationsszenario bei einem mehr als doppelt so hohen Wert (116 TWh).

⁵ Hierbei ist die zugrunde liegende Annahme, dass eine Beimischung von bis zu 100% realisiert werden kann.

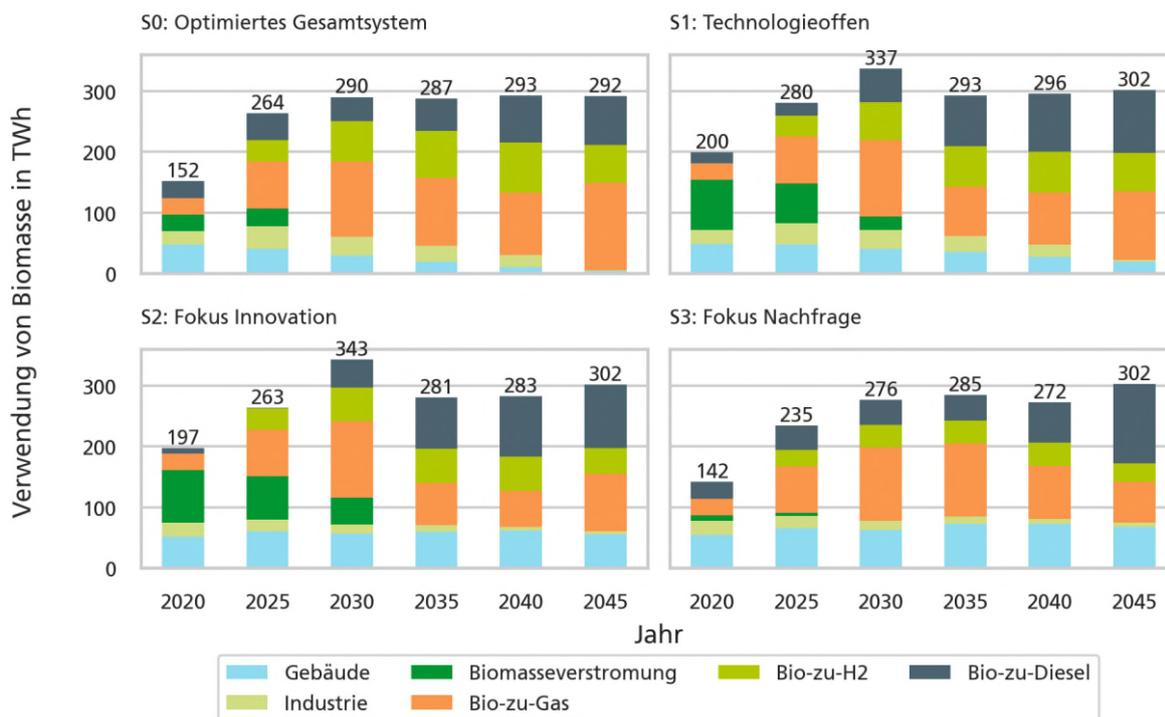
Abbildung 33: Bereitstellung und Verwendung von Gas



Quelle: Fraunhofer ISE

Ein weiterer Unterschied zwischen den Szenarien liegt in der Verwendung von fester Biomasse, wie in Abbildung 34 dargestellt. Im optimierten Vergleichsszenario wird die feste Biomasse (Scheitholz bzw. Holzpellets) im Gebäudesektor bis zum Jahr 2045 nahezu vollständig substituiert. Im Innovations- und Nachfrageszenario spielt feste Biomasse mit 55-65 TWh hingegen noch eine ähnlich große Rolle wie im heutigen Raumwärme Bereitstellungsmix. Im Vergleichsszenario wird Biomasse in 2045 zum Großteil für die Bereitstellung als Biogas verwendet. Im Nachfrageszenario ist Biodiesel die größte Verwendung von fester Biomasse.

Abbildung 34: Verwendung von fester Biomasse



Quelle: Fraunhofer ISE

Fazit und Diskussion

Insgesamt zeigt sich, dass durch die Berücksichtigung von politischen Maßnahmen und dem daraus resultierenden Akteursverhalten im Gebäudesektor eine deutliche Abweichung in der Transformation des Gesamtsystems ergibt. Es zeigt sich ein höherer Transformationsdruck, der sich im Rahmen der Modellierung beispielsweise dadurch lösen lässt, indem erneuerbare synthetische Gase sowie Biomassepotenziale erhöht werden. Während dies mathematisch einfach ist, stellt sich die Frage der Realisierbarkeit dieser Annahmen. Die Wasserstoffstrategie der Bundesregierung zielt darauf ab, bis 2030 10 GW Elektrolyseleistung in bereitzustellen. Zudem werden Wasserstoff Partnerschaften geschlossen, um benötigte Wasserstoffimporte decken zu können. Bereits im kostenoptimalen System ergibt sich ein erheblicher Transformationsbedarf. Diese Anforderungen werden jedoch durch eine Abweichung vom kostenoptimalen Transformationspfade im Gebäudesektor verstärkt. Ob dieser zusätzliche Bedarf (an Biomasse und synthetischen erneuerbaren Energieträgern), der sich durch eine verzögerte Dekarbonisierung des Gebäudesektors, bzw. durch die weitere Verwendung von gasbasierten Heizungssystemen ergibt, ist fraglich. Dennoch ist festzuhalten, dass die Systeme abgesehen von unterschiedlichen Mengengerüsten keine drastischen Änderungen, im Sinne anderer Transformationspfade in den anderen Verbrauchs- und Umwandlungssektoren hervorrufen. Zu beachten sind jedoch folgende Aspekte: in der Tendenz gibt es Verlagerungseffekte hinsichtlich der Verwendung von Biomasse. In den Politikszenerien findet weniger Biomasse im Industriesektor Verwendung, da diese im Gebäudesektor nicht substituiert wird, wie es im kostenoptimalen Vergleichsszenario der Fall ist. Ein weiterer Aspekt ist, dass die Sanierungstiefe im Nachfrageszenario ein deutlich höheres Niveau aufweist, der Passivhausstandard in 23% der Gebäude realisiert wird. Zudem besteht ein erheblicher Unterschied im Technologiemix des Gebäudesektors. Im kostenoptimalen Fall ist die Substitution von Gas- und Ölheizungen durch Wärmepumpen und Fernwärmeanschlüsse die beste Lösung. In den Politikszenerien hingegen nehmen Wärmepumpen eine weniger bedeutsame Rolle ein. Fernwärme hingegen muss deutlich ausgebaut werden.

Es kann also festgehalten werden, dass die Integration von Akteursverhalten und damit die implizite Berücksichtigung politischer Maßnahmen spannende neue wissenschaftliche Erkenntnisse und damit verbundene politische Implikationen generiert. Es konnte ebenfalls gezeigt werden, dass ein Abweichen vom kostenoptimalen Transformationspfad im Gebäudesektor direkt mit einem erhöhten Importbedarf synthetischer Energieträger in Verbindung steht und folglich die Abhängigkeit von Energieimporten steigen lässt. Ein weiterer Schritt wäre die Berücksichtigung des Akteursverhaltens auf die anderen Sektoren zu erweitern.

5.2 Ergebnisse der Modellierung mit Enertile

5.2.1 Kopplung von Invert und Enertile

Der Endenergiebedarf für Heizungsanwendungen in Gebäuden wird von INVERT berechnet. Für jedes Szenario wird die Gesamtnachfrage nach Strom und Fernwärme als Input für Enertile verwendet und die Bereitstellung dieser Energieträger wird optimiert.

Die folgenden jährlichen Bedarfswerte aus INVERT werden in Enertile verwendet: Fernwärmebedarf, Strombedarf aus Wärmepumpen und sonstiger Strombedarf (Stromheizungen und Hilfsenergie). Diese Bedarfsmengen werden separat für die Sektoren Privathaushalte und Gewerbe, Handel, Dienstleistungen (GHD) bilanziert.

5.2.2 Rahmenbedingungen der Szenarien in Enertile

Für das Energiesystemmodell Enertile ist eine breite Basis an Annahmen und Parametern notwendig. Beispielsweise muss die Nachfrageentwicklung anderer Sektoren wie Verkehr und Industrie ebenfalls als Input in die Szenarien einfließen. Im Rahmen von Manifold liegt der Fokus jedoch lediglich auf der Entwicklung der Gebäudewärme, sodass für die anderen Nachfragekategorien keine szenariospezifischen Daten zur Verfügung stehen. Folglich wird für alle weiteren Annahmen, die nicht in Manifold spezifiziert sind auf andere Studien und Berechnungen des Modells Enertile zurückgegriffen. Diese anderen Parameter werden für alle Szenarien in Manifold konstant gehalten, um die Vergleichbarkeit und Interpretierbarkeit der Unterschiede zwischen den Szenarien zu gewährleisten. Als Grundlage bietet sich hierfür das Szenario T45-Strom der Langfristszenarien 3 an. Im Rahmen der Studie Langfristszenarien 3 wurden detaillierte Szenarien für die Dekarbonisierung Deutschlands bis zum Jahr 2045 gerechnet. Im Rahmen dieses Dienstleistungsauftrages wurden für das Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz Daten auf europäischer Ebene und auf Bundesebene aufbereitet analysiert. Diese Daten sind in großen Teilen auch auf der Website www.langfristszenarien.de veröffentlicht. Das Szenario T45-Strom setzt auf eine starke Elektrifizierung des Energiesystems, um Treibhausgasneutralität zu erreichen. Für die drei Politikszenerarien in Manifold ist dies eine bestens geeignete Grundlage. Für das Referenzszenario könnte theoretisch ein anderes Szenario ohne Zielerreichung der Treibhausgasneutralität in Deutschland als Basis sinnvoll sein. Jedoch würden dann sehr viele Parameter und Annahmen zwischen Referenzszenario und Politikszenerarien variieren, sodass die anschließende Auswertung der Ergebnisse nicht mehr eindeutig auf die Entwicklungen im Gebäudesektor zurückzuführen wäre. Aus diesem Grund wird das Zielszenario T45-Strom ebenfalls als Basis für das Referenzszenario in Manifold genutzt.

5.2.3 Ergebnisse

In den folgenden Abschnitten werden die detaillierten Ergebnisse zur Energieversorgung vorgestellt. Die Auswertung der Szenarien in Enertile erfolgt mit Fokus auf die beiden politisch relevanten Jahre 2030 und 2045. Der analytische Schwerpunkt liegt auf Deutschland. Dennoch wurden auch

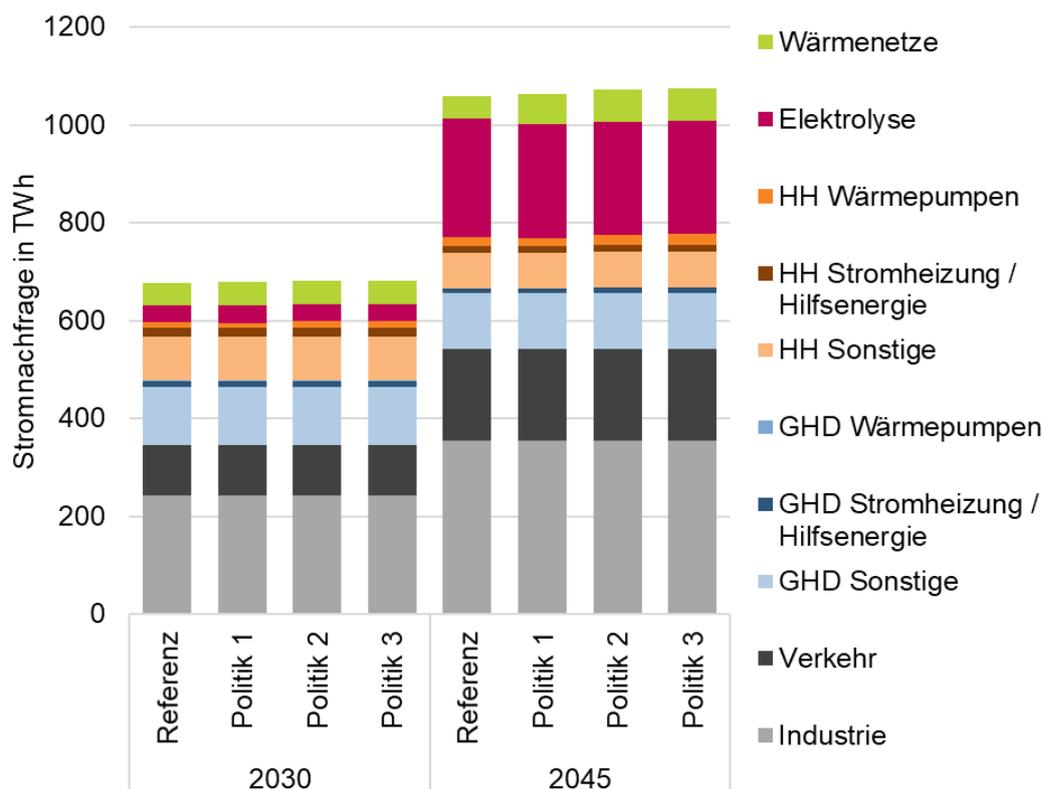
alle angrenzenden europäischen Regionen modelliert, da die Energiesysteme heute nicht mehr in einem ausschließlich nationalen Kontext angemessen betrachtet werden können. Zusätzlich zu Ergebnissen für Deutschland werden somit teilweise auch Ergebnisse für Europa dargestellt.

5.2.3.1 Stromnachfrage und Fernwärmebedarf

Die Energienachfrage aus den Nachfragesektoren ist ein Schlüsselement für den Versorgungs- und Umwandlungssektor. **Abbildung 35** zeigt die Entwicklung der Gesamtstromnachfrage in den verschiedenen Szenarien bis 2045 in Deutschland. Die Stromnachfrage kann in drei Kategorien eingeteilt werden. Erstens, die Stromnachfrage, die in allen Szenarien identisch ist und außerdem den größten Anteil an der Gesamtnachfrage hat. Diese umfasst die Stromnachfrage aus anderen Sektoren (Verkehr, Industrie, Sonstige in GHD und HH) und basiert auf den Daten des T45-Strom der Langfristszenarien. Die zweite Kategorie umfasst die Stromnachfrage aus verschiedenen dezentralen Heizungsanwendungen, wie sie von INVERT modelliert wurden: elektrische Wärmepumpen und Stromheizungen bzw. Hilfsenergie in Haushalten und GHD. Diese Mengen variieren zwischen den Szenarien je nach Ausgestaltung des Szenariodesigns in INVERT. Die dritte Kategorie ist der Strombedarf für Elektrolyse und Wärmenetze innerhalb von Enertile. Zu dieser Kategorie gehören zentral installierte Elektrokessel und Großwärmepumpen für die Fernwärmeversorgung sowie der Strombedarf für die Wasserstoffproduktion (Elektrolyse), die innerhalb Deutschlands anfällt. Auch diese Mengen können zwischen den Szenarien variieren, da sie Bestandteil der Optimierung in Enertile sind.

Im Jahr 2030 liegt die Gesamtstromnachfrage bei rund 700 TWh. Bis zum Jahr 2045 steigt der Bedarf deutlich auf etwa 1100 TWh an. Die Unterschiede zwischen den Szenarien fallen in beiden Jahren gering aus. Dies liegt daran, dass die variierenden Stromnachfragen aus INVERT einen eher kleinen Anteil an der Gesamtstromnachfrage haben. Die Anteile liegen im Bereich von 6 bis 7% im Jahr 2030 und im Bereich von 4 bis 5% im Jahr 2045.

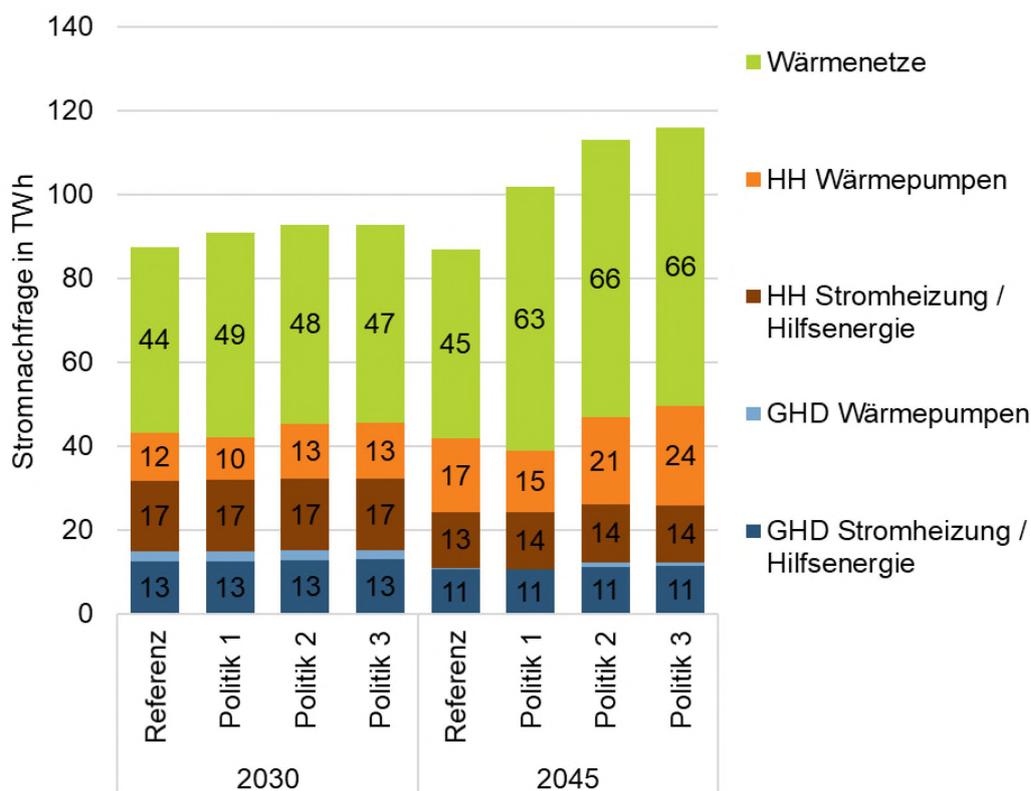
Abbildung 35: Entwicklung der Stromnachfrage in Deutschland



Quelle: Fraunhofer ISI

Für einen besseren Überblick über die Unterschiede zwischen den Szenarien zeigt die folgende Abbildung nur die Stromnachfrage für die dezentrale und zentrale Wärmeerzeugung. Im Referenzszenario bleibt der Gesamtstrombedarf von rund 87 TWh konstant in beiden Jahren. Insgesamt fällt in den Politikszenerarien ein höherer Strombedarf zur Wärmeerzeugung an. Dieser liegt im Jahr 2045 mit etwa 100 bis 115 TWh höher als noch im Jahr 2030 mit rund 90 TWh. Der Strombedarf für Stromheizungen und Hilfsenergie ist für Haushalte und GHD in beiden Jahren vergleichsweise konstant über die vier verschiedenen Szenarien. Dabei fällt der Bedarf im Jahr 2045 etwas geringer aus als noch im Jahr 2030. Der Strombedarf der Wärmepumpen variiert zwischen den Szenarien vor allem im Haushaltssektor. Im Zeitverlauf nimmt in allen vier Szenarien der Strombedarf für Wärmepumpen in Haushalten zu. Weiterhin steigt der Strombedarf für die zentrale Wärmebereitstellung in Fernwärmenetzen zum Teil deutlich an. Die strombasierten Wärmetechnologien stellen jedoch nur einen Teil der möglichen Versorgungsoptionen in Fernwärmenetzen dar.

Abbildung 36: Entwicklung der Stromnachfrage für die Wärmeerzeugung in Deutschland

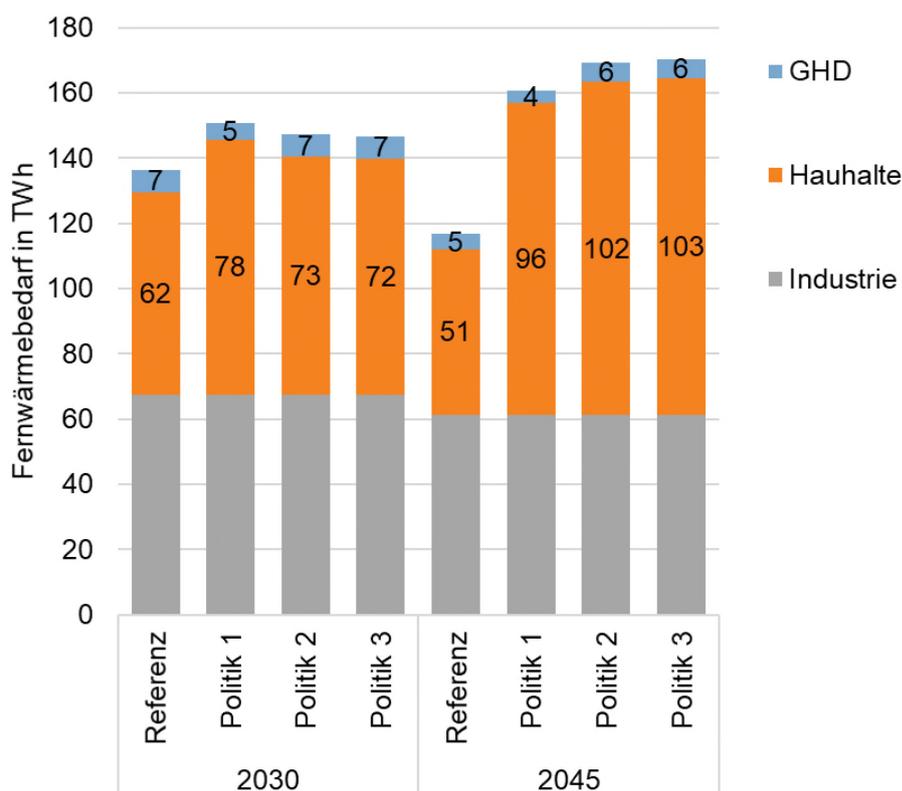


Quelle: Fraunhofer ISI

Abbildung 37 zeigt die Entwicklung des gesamten Fernwärmebedarfs in Deutschland für die vier Szenarien. Dieser Bedarf fällt in drei Nachfragesektoren an: Industrie, Haushalte und GHD. Der Fernwärmebedarf der Industrie ist in allen Szenarien konstant und entstammt dem Szenario T45-Strom der Langfristszenarien. Die Fernwärmebedarfe für Haushalte und GHD werden im Modell INVERT ermittelt und variieren je nach Szenariodesign. Der Anteil der Haushalte nimmt einen großen Anteil des Gesamtbedarfs ein und somit zeigt sich hier eine etwas größere Spreizung zwischen den verschiedenen Szenarien in Manifold.

Für den Bereich GHD sind nur geringfügige Änderungen zwischen den Szenarien und Jahren erkennbar. Der Gesamtbedarf variiert zwischen 4 und 7 TWh. Im Referenzszenario sinkt der Fernwärmebedarf der Haushalte von 62 TWh in 2030 auf 51 TWh in 2045. Im Gegensatz hierzu steigt der Fernwärmebedarf in allen drei Politikszzenarien moderat an. Hierdurch ergibt sich ein deutlich höherer Fernwärmebedarf in den Politikszzenarien für das Jahr 2045.

Abbildung 37: Entwicklung des Fernwärmebedarfs in Deutschland



Quelle: Fraunhofer ISI

5.2.3.2 Stromerzeugung und installierte Leistung

Im folgenden Abschnitt werden die Modellierungsergebnisse des Stromsektors dargestellt. Dazu zeigen **Abbildung 38** und **Abbildung 39** die Entwicklungen in Deutschland und **Abbildung 40** und **Abbildung 41** die Entwicklungen in Europa.

Insgesamt unterscheiden sich die Szenarien mit Bezug auf den Erzeugungspark kaum. Die installierte Leistung in Deutschland steigt in den kommenden Jahren und bis 2045 sehr stark an. Dieser Ausbau wird vor allem durch politische Zielvorgaben getrieben. In allen vier Szenarien dominieren die erneuerbaren Energien Photovoltaik, Wind an Land und Wind auf See mit Werten von insgesamt sehr deutlich den Erzeugungspark. Die politischen Ziele von 215 GW Photovoltaik, 115 GW Onshore-Wind und 30 GW Offshore-Wind im Jahr 2030 werden erreicht oder sehr leicht übertroffen. Auch die Wasserstoffumwandlung spielt in allen Szenarien eine sehr kleine, aber wichtige Rolle im Stromsystem. Der Rückgang der installierten Kapazität fossiler Brennstoffe ist ebenfalls deutlich erkennbar. Auch im Jahr 2045 werden die politischen Ausbauziele der erneuerbaren Energien eingehalten. In allen Szenarien erreicht Wind auf See 70 GW installierte Leistung, Wind an Land 160 GW und PV 400 GW. Da bis 2045 alle fossilen Brennstoffe aus dem deutschen Stromsystem verschwinden, machen diese drei erneuerbaren Technologien die absolute Mehrheit des deutschen Kraftwerksparks aus. Im Jahr 2045 erreicht die Wasserstoffrückverstromung relevante Anteile von knapp 40 GW an der installierten Leistung. Diese Technologie übernimmt wichtige Stabilisierungsfunktionen in einem Stromsystem, das weitgehend durch fluktuierende erneuerbare Energieerzeugung geprägt ist.

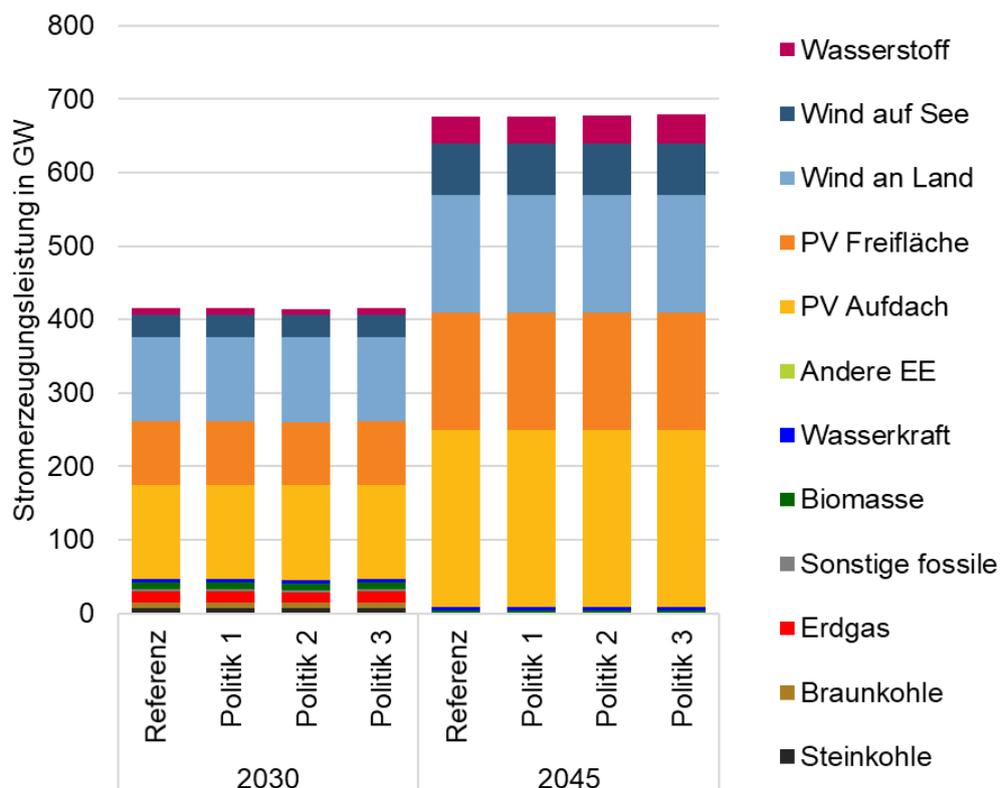
Die Stromerzeugung in Deutschland erreicht im Jahr 2030 eine Gesamtmenge von etwa 730 TWh. Diese Menge steigt bis zum Jahr 2045 auf ungefähr 1150 TWh an. Strukturell unterscheiden sich die Szenarien kaum voneinander, da die verschiedenen Energietechnologien eine relativ konstante

Gewichtung haben. Photovoltaik und Wind machen in 2030 ca. 70% der Gesamterzeugung aus. Dieser Anteil steigt im Jahr 2045 auf über 90%. Des Weiteren importiert Deutschland in allen Szenarien (sehr) kleinere Mengen an Strom aus dem europäischen Ausland. Die Mengen liegen hierbei im Bereich von 29 bis 32 TWh im Jahr 2030 und zwischen 35 und 47 TWh im Jahr 2045. Abregelung von EE-Anlagen findet in allen Szenarien im Zieljahr 2045 in einem begrenzten Umfang statt.

Die insgesamt geringe Variabilität zwischen den einzelnen Szenarien lässt sich einerseits durch die geringen Unterschiede in der Stromnachfrage (vgl. **Abbildung 35**) und andererseits durch die politischen Ausbauziele und Vorgaben erklären. Insgesamt lässt sich festhalten, dass Photovoltaik und Wind sowohl im Zielsystem 2045 als auch in den Transformationsjahren davor den größten Anteil an der Stromversorgung in Deutschland haben. Das daraus resultierende Stromsystem wird von einer fluktuierenden (wetter-, tages- und jahreszeitabhängigen) Stromerzeugung dominiert und muss stabilisiert werden. Diese Stabilisierung wird durch Wasserstoffrückverstromung und Stromimporte erreicht.

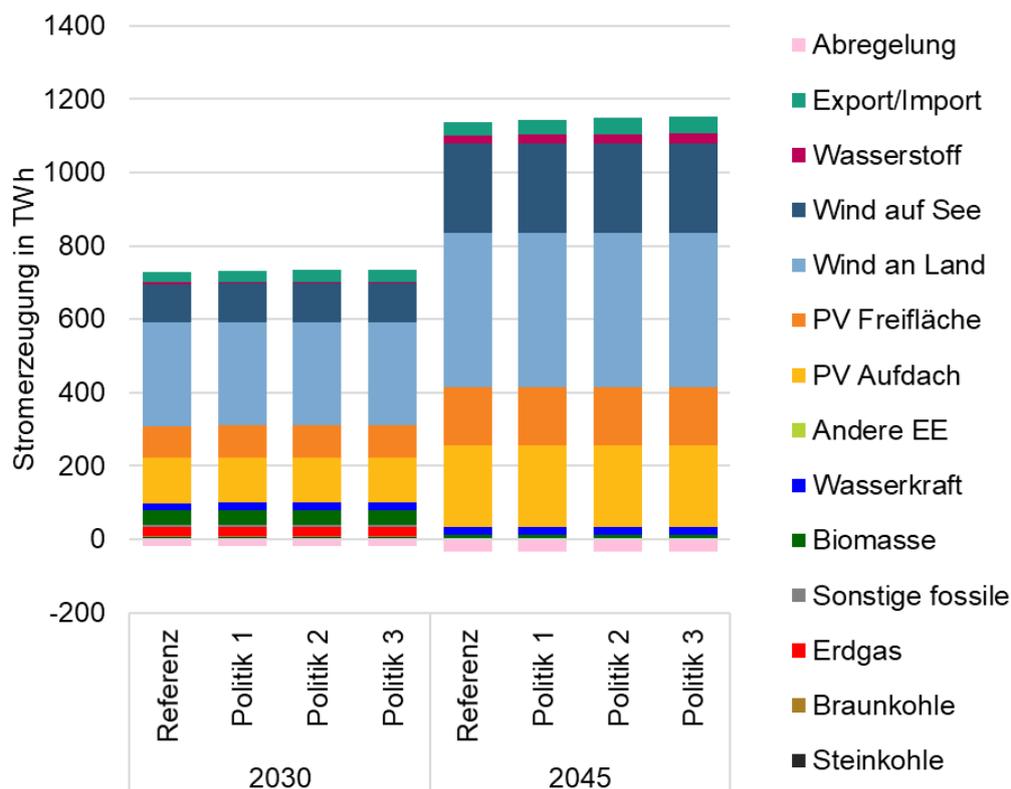
In Europa zeigen sich die gleichen Entwicklungen wie bereits im deutschen Stromsystem. Das europäische Stromsystem ist ebenfalls geprägt von einem starken Zubau der erneuerbaren Technologien Wind und Photovoltaik und dem Phase-out von fossilen Energieträgern. Auch europaweit werden Wasserstoffrückverstromungskapazitäten aufgebaut. Die Kernkraft macht ebenfalls einen relevanten Anteil an den Stromerzeugungskapazitäten in Europa aus, konzentriert sich jedoch auf einige wenige Länder (z. B. Frankreich).

Abbildung 38: Entwicklung der Stromerzeugungsleistung in Deutschland



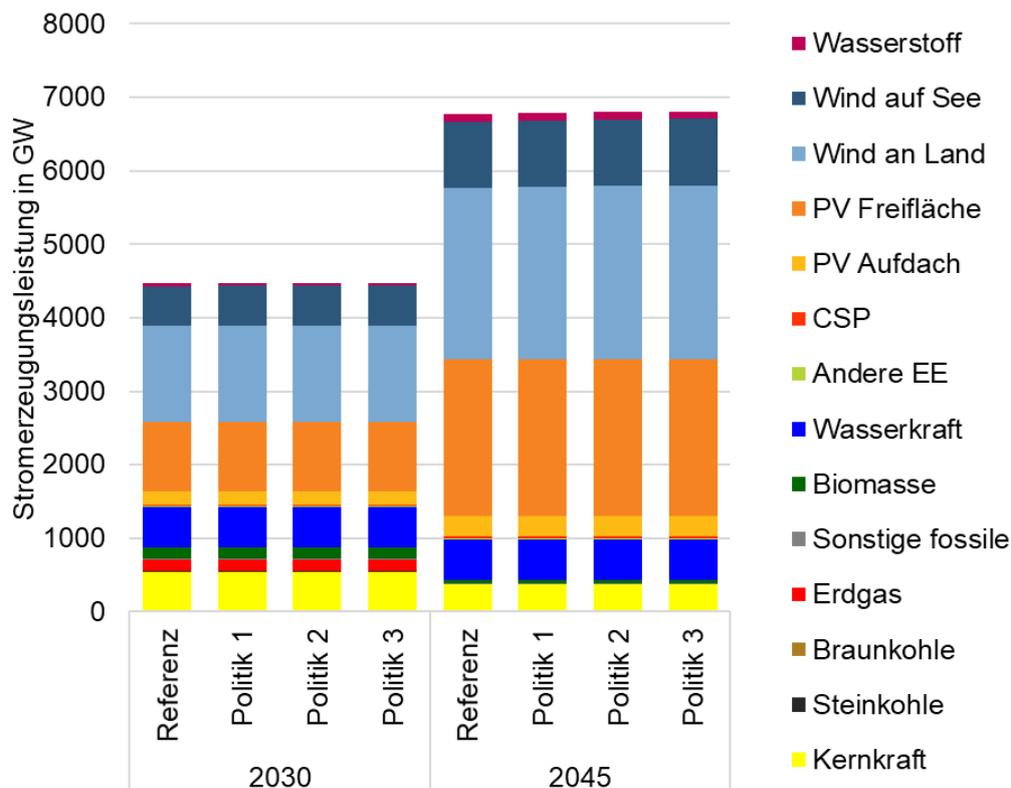
Quelle: Fraunhofer ISI

Abbildung 39: Entwicklung der Stromerzeugung in Deutschland



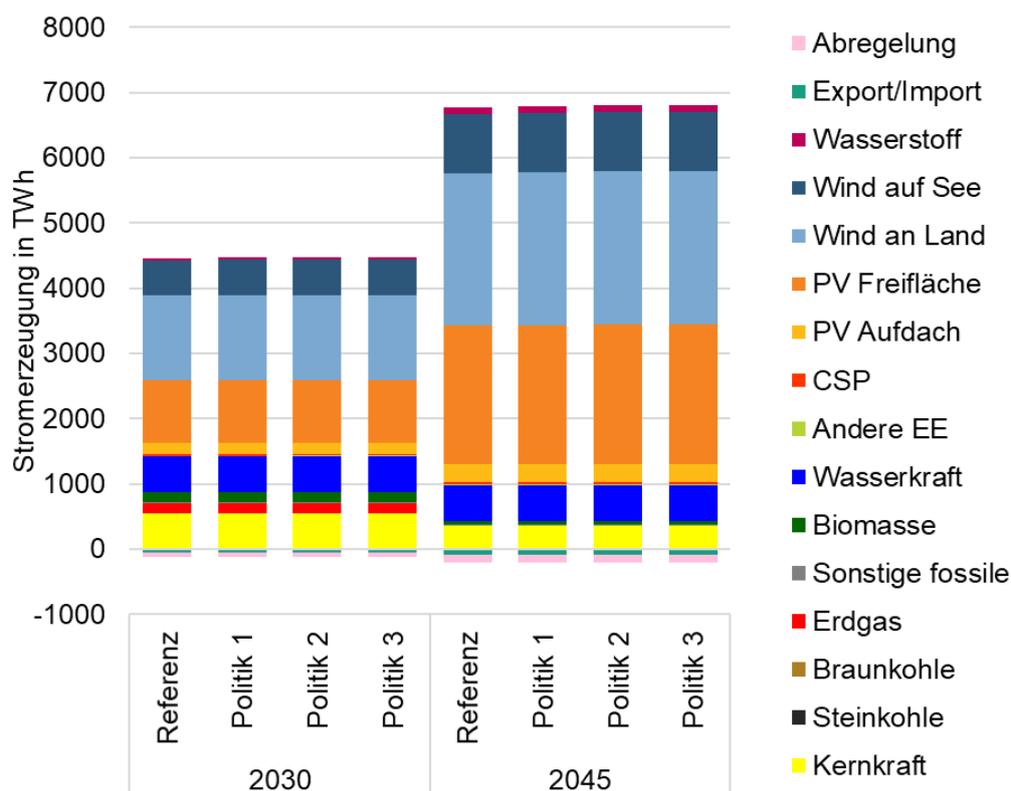
Quelle: Fraunhofer ISI

Abbildung 40: Entwicklung der Stromerzeugungsleistung in Europa



Quelle: Fraunhofer ISI

Abbildung 41: Entwicklung der Stromerzeugung in Europa



Quelle: Fraunhofer ISI

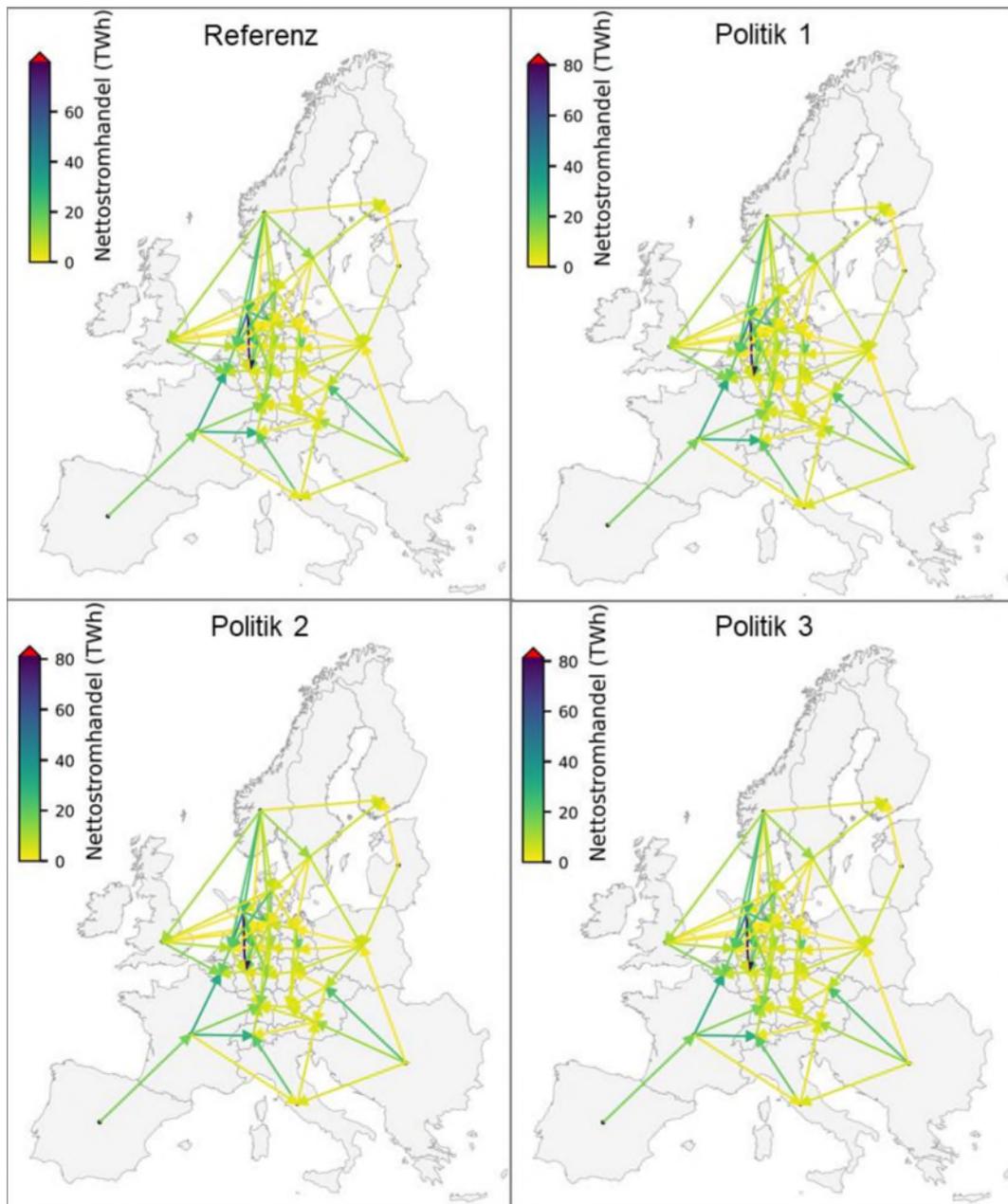
5.2.3.3 Stromhandel

Im europäischen Verbund ergibt sich als Konsequenz von Potenzialen sowie Ausbau von erneuerbaren Energien einerseits, sowie der Stromnachfrage andererseits, folgendes Bild für den europäischen Handel von Strom (Abbildung 42).

In allen Szenarien werden in Europa sehr große Strommengen gehandelt und transportiert. Dieses robuste Ergebnis bestätigt, dass es technisch-ökonomisch kosteneffizienter ist, gute EE-Ressourcenpotenziale dort zu nutzen, wo sie vorhanden sind, und den Strom bei Bedarf zu den großen Verbrauchszentren zu transportieren.

Deutschland ist über alle Szenarien hinweg durchweg ein großer Stromimporteuer. Insbesondere der Süden, aber auch der Westen Deutschlands, importieren permanent sehr relevante Strommengen aus anderen deutschen Regionen (vor allem aus dem Norden) sowie aus den europäischen Nachbarländern (vor allem aus dem Norden, Südwesten und Osten). Besonders große Handelsströme sind zwischen folgenden Regionen zu beobachten: von der deutschen Offshore-Zone nach Nordwestdeutschland; von Nordeuropa (insbesondere Norwegen) nach Norddeutschland und BENELUX; von den Britischen Inseln nach Kontinentaleuropa; von der Iberischen Halbinsel über Frankreich nach Deutschland; vom Balkan über verschiedene Länder nach Deutschland; und innerhalb Deutschlands von Nord nach Süd. Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass die mitteleuropäischen Länder dazu neigen, Strom zu importieren, während die Länder an der europäischen "Peripherie" Strom in diese Länder exportieren.

Abbildung 42: Europäischer Stromhandel im Jahr 2045



Quelle: Fraunhofer ISI

5.2.3.4 Fernwärmeerzeugung

In diesem Abschnitt werden die Ergebnisse der Wärmeerzeugung in Wärmenetzen in Deutschland vorgestellt. Die Höhe der Fernwärmeerzeugung insgesamt ergibt sich aus den summierten Bedarfen der Sektoren Industrie, Haushalte und GHD (vgl. **Abbildung 37**). Folgende Abbildung zeigt den Erzeugungsmix im Vergleich der vier Szenarien für die Jahre 2030 und 2045. Die Abbildung zeigt, dass sich die zukünftige Wärmeerzeugung hinsichtlich der Erzeugungstechnologien stark vom heutigen Erzeugungsmix unterscheidet. Generell ähnelt sich der Technologiemit innerhalb der Szenarien stark, obwohl sich die Bedarfsmengen unterscheiden.

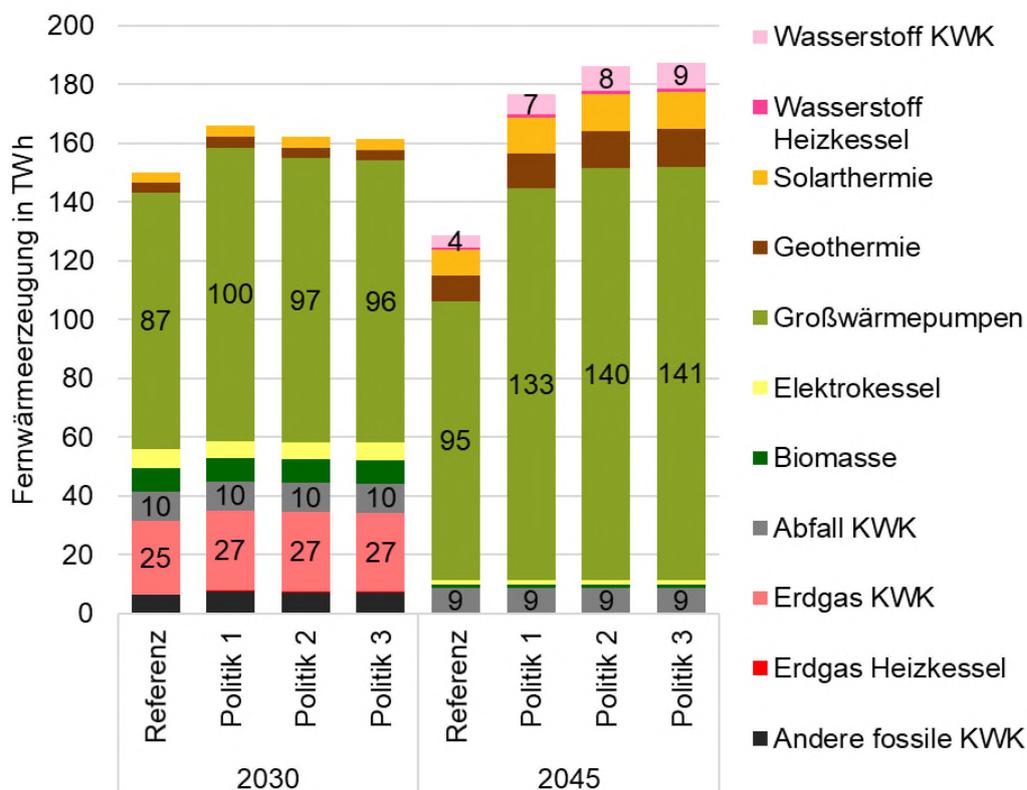
Im Jahr 2030 sind fossile KWK-Anlagen mit noch relevanten Anteilen vertreten. Vor allem die Gas-KWK trägt mit 25 TWh im Referenzszenario und 27 TWh in den drei Politikszennarien noch einen

bedeutenden Teil der Wärmeerzeugung bei. Zu einem großen Teil beruht die zentrale Fernwärmeversorgung jedoch bereits auf Großwärmepumpen. Je nach Szenario werden so zwischen knapp 90 TWh (Referenzszenario) und 100 TWh Wärme (Politikszenerien) mittels Großwärmepumpen erzeugt. Dies entspricht einem prozentualen Anteil von rund 60% an der Gesamtwärmeerzeugung. Elektrokessel als weitere direktelektrische Wärmeerzeugungstechnologie sind in kleinerem Umfang ebenfalls im Mix präsent. Die Abfallverbrennung liefert in allen Szenarien rund 10 TWh an Fernwärme. Die erneuerbaren Technologien Solar- und Geothermie sowie Biomasse-KWK komplettieren den Wärmeerzeugungsmix in kleinen Teilen. Wasserstoff hingegen spielt im Jahr 2030 noch keine Rolle.

Im Zieljahr 2045 ist der deutsche Fernwärmeerzeugungsmix gemäß den politischen Vorgaben vollständig dekarbonisiert. Die Zunahme der Großwärmepumpen ist sehr deutlich, deren prozentualer Anteil an der zentralen Wärmeerzeugung im Vergleich zu 2030 weiter zunimmt und Werte im Bereich von 75% erreicht. Die Anteile von Solar- und Geothermie nehmen etwas zu, während der Anteil der Elektrokessel, der 2030 bereits relativ gering ist, weiter zurückgeht. Der Einsatz von Biomasse sinkt ebenfalls deutlich. Die Wärmeerzeugung aus Abfall-KWK bleibt in den Szenarien mit 9 TWh annähernd konstant. Bei der Nutzung von Wasserstoff sind ebenfalls große Veränderungen im Vergleich zum Jahr 2030 zu beobachten. Im Jahr 2045 wird Wasserstoff-KWK in allen Szenarien zwischen 4 TWh (Referenzszenario) und 7 bis 9 TWh (Politikszenerien) in relevantem Umfang in den Erzeugungsmix einbezogen. Wasserstoff-Heizkessel werden zur Abdeckung von Lastspitzen eingesetzt und leisten auch kleine Beiträge zur Erzeugung.

Folglich kann geschlussfolgert werden, dass Großwärmepumpen in Wärmenetzen eine "no-regret"-Option darstellen und einen Großteil der Wärmeerzeugung kostenoptimal übernehmen können, da sie gleichzeitig eine große Flexibilität für den Stromsektor bereitstellen.

Abbildung 43: Entwicklung der Fernwärmeerzeugung in Deutschland



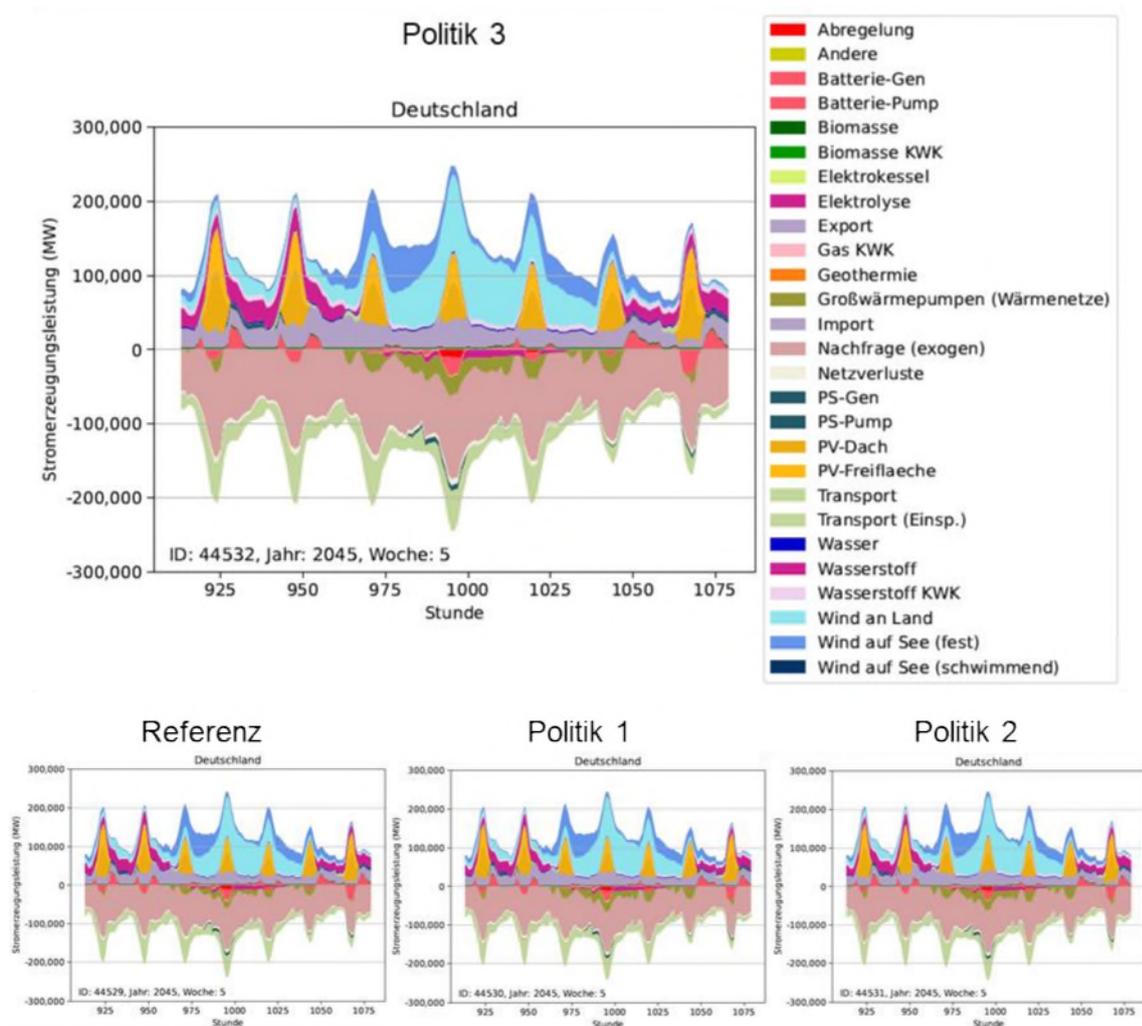
Quelle: Fraunhofer ISI

5.2.3.5 Dispatch Stromsystem und Wärmenetze

Die Energiesektoren Strom und Wärme sind eng miteinander gekoppelt. Die Kopplung der verschiedenen Energiesysteme erhöht die Flexibilität und senkt gleichzeitig die Kosten. Aus Sicht der Energieversorgung ist insbesondere die Einspeisesituation der jeweiligen Energieträger von Bedeutung. Diese wird in dem folgenden Abschnitt anhand von realen Wetterdaten (stündliche, reale Wetterdaten auf Basis des Wetterjahres 2010) für die Sektoren Strom und Wärmenetze kurz analysiert. Es werden jeweils eine Sommer- und eine Winterwoche für Deutschland im Jahr 2045 dargestellt. Da die Unterschiede zwischen den Szenarien gering ausfallen, wird die Darstellung und Erläuterung auf das PolitikszENARIO 3 fokussiert. Dennoch sind alle vier Szenarien im Vergleich gezeigt.

In der Winterwoche wird die Stromerzeugung insbesondere in der Mitte der Woche durch Wind an Land dominiert und teilweise durch Wind auf See ergänzt. Zu Beginn und Ende der Woche, wenn die Windeinspeisung geringer ausfällt, wird das Stromsystem durch Wasserstoffrückverstromung stabilisiert. Weiterhin spielen Stromimporte aus den Nachbarländern eine zentrale Rolle über die gesamte Woche hinweg. Die zentralen Großwärmepumpen in Wärmenetzen werden ebenfalls relativ flexibel eingesetzt und nehmen Strom aus Erzeugungsspitzen von PV und Wind ab. Zusammenfassend lässt sich sagen, dass die Sektorkopplung von Strom und Wärme im Winter besonders wichtig für den Ausgleich der Flexibilität der beiden Systeme ist.

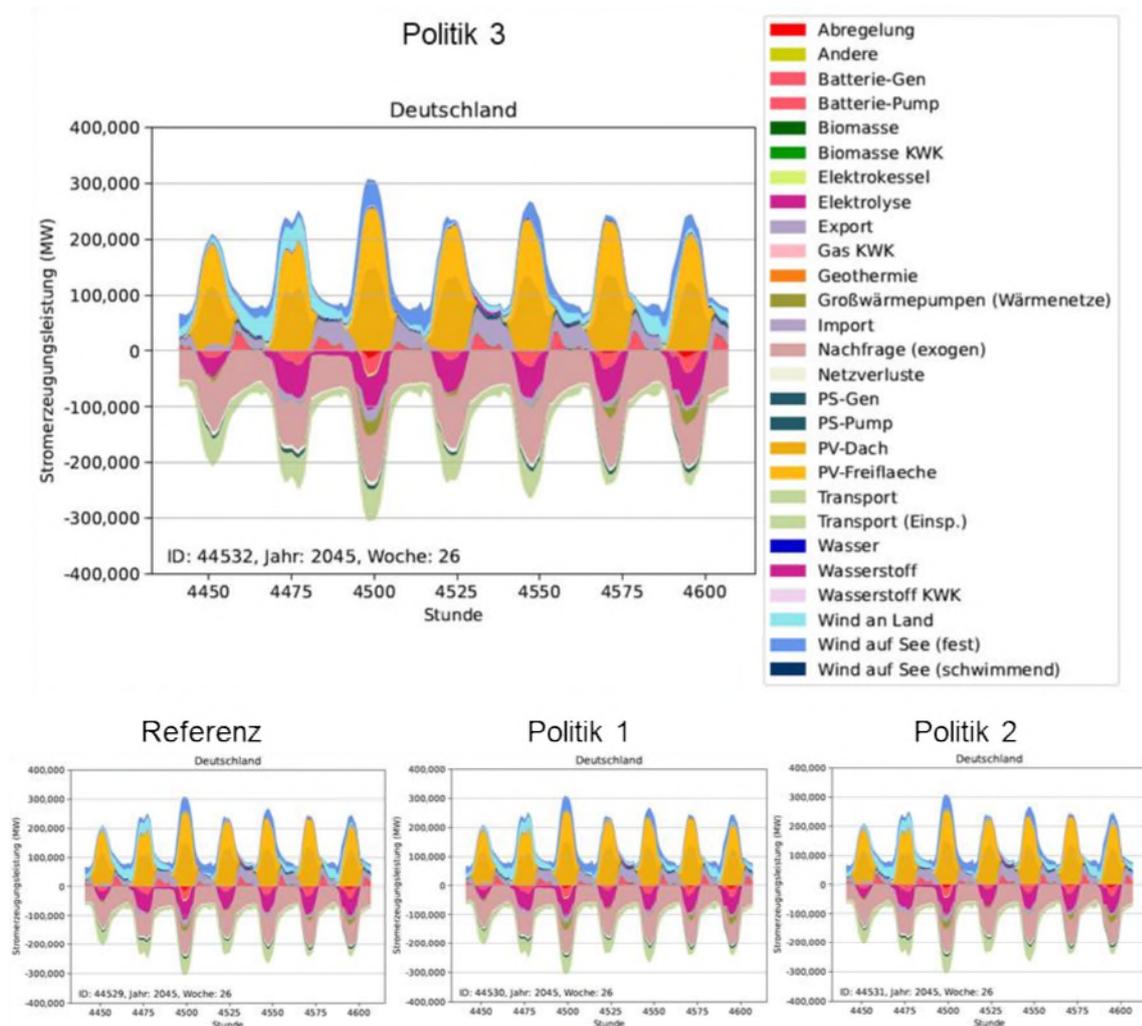
Abbildung 44: Dispatch Stromsystem Winter (Deutschland, 2045)



Quelle: Fraunhofer ISI

Im Sommer ergibt sich durch andere Wetter- und Witterungsbedingungen ein grundsätzlich anderes Bild. Das Stromsystem wird eindeutig von solaren Erzeugungsspitzen dominiert. Um die Mittagszeit stammt fast die gesamte Stromerzeugung in Deutschland aus der PV-Technologie. Die Erzeugung wird nur durch sehr geringe Beiträge aus Windkraft ergänzt. Nachts, ohne Sonneneinstrahlung, sind Stromimporte unabdingbar und decken fast den gesamten nationalen Stromverbrauch. Über die Importe hinaus gibt es kaum nennenswerte Faktoren zur Stabilisierung des Stromsystems, insbesondere die Wasserstoffumstellung ist nicht erforderlich. Auf der Nachfrageseite richtet sich alle bestehende Flexibilität an der PV-Erzeugung aus. Zusammenfassend lässt sich auch im Sommer feststellen, dass eine enge Abstimmung innerhalb der Energiesektoren von Vorteil ist.

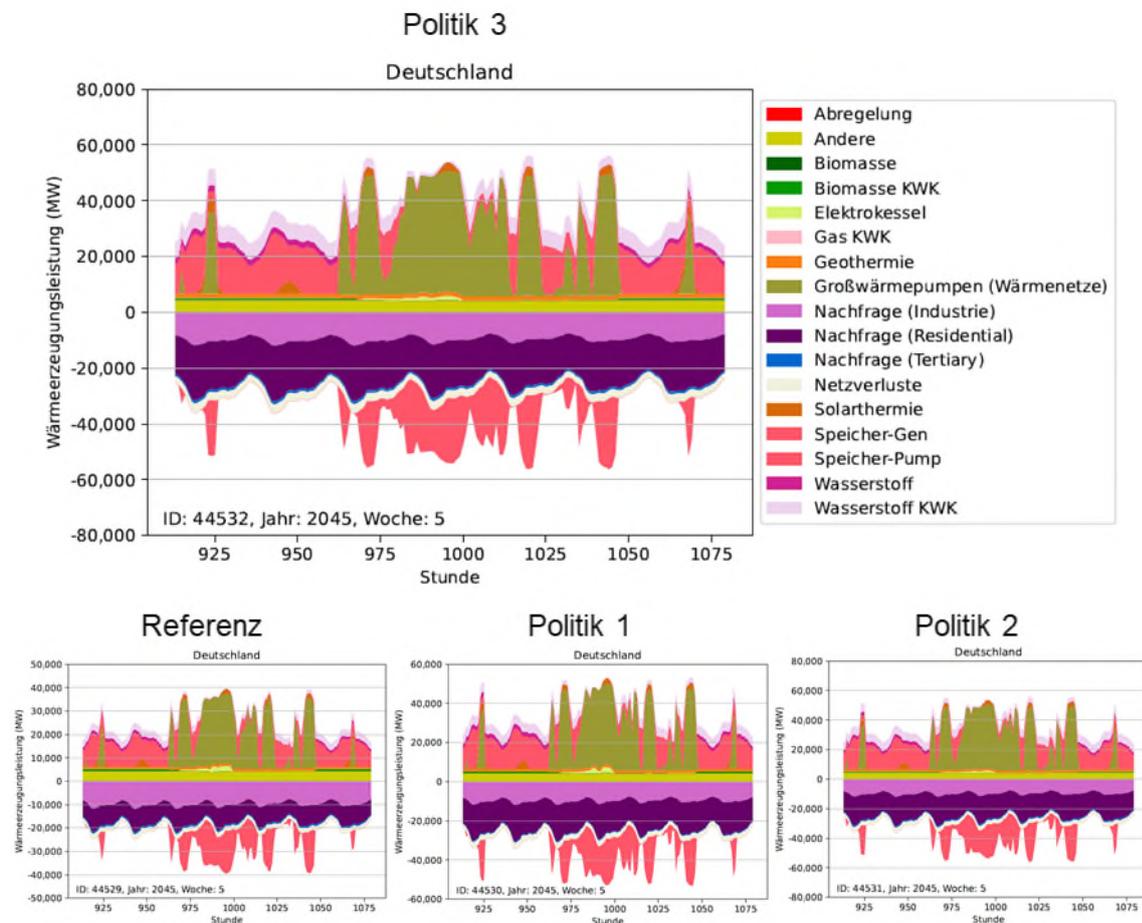
Abbildung 45: Dispatch Stromsystem Sommer (Deutschland, 2045)



Quelle: Fraunhofer ISI

In Wärmenetzen erzeugen Großwärmepumpen viel Fernwärme zur Wochenmitte, wenn die Stromerzeugung aus Wind sehr hoch ist. Die gilt ebenfalls zum Wochenende hin, wenn die PV-Erzeugung hoch ist. Diese Wärmeerzeugung wird größtenteils direkt genutzt, aber auch in erheblichem Umfang in Wärmespeichern zwischengespeichert. Die Wasserstoff-KWK ist in der analysierten Winterwoche fast durchgehend aktiv. Zusammen mit der Entladung der Wärmespeicher macht sie ebenfalls einen relevanten Teil der Wärmeversorgung aus. Der Wärmeerzeugungsmix wird durch Müllverbrennung, Biomasse und Solarenergie/Geothermie vervollständigt. Die Analyse macht deutlich, dass Großwärmepumpen und Wärmespeicher absolute Schlüsseltechnologien für den Wärmeerzeugungsmix sind. In besonders herausfordernden Wochen (ungünstige Wetterbedingungen für die Stromerzeugung) übernimmt die Wasserstoff-KWK einen Teil der Wärmeerzeugung.

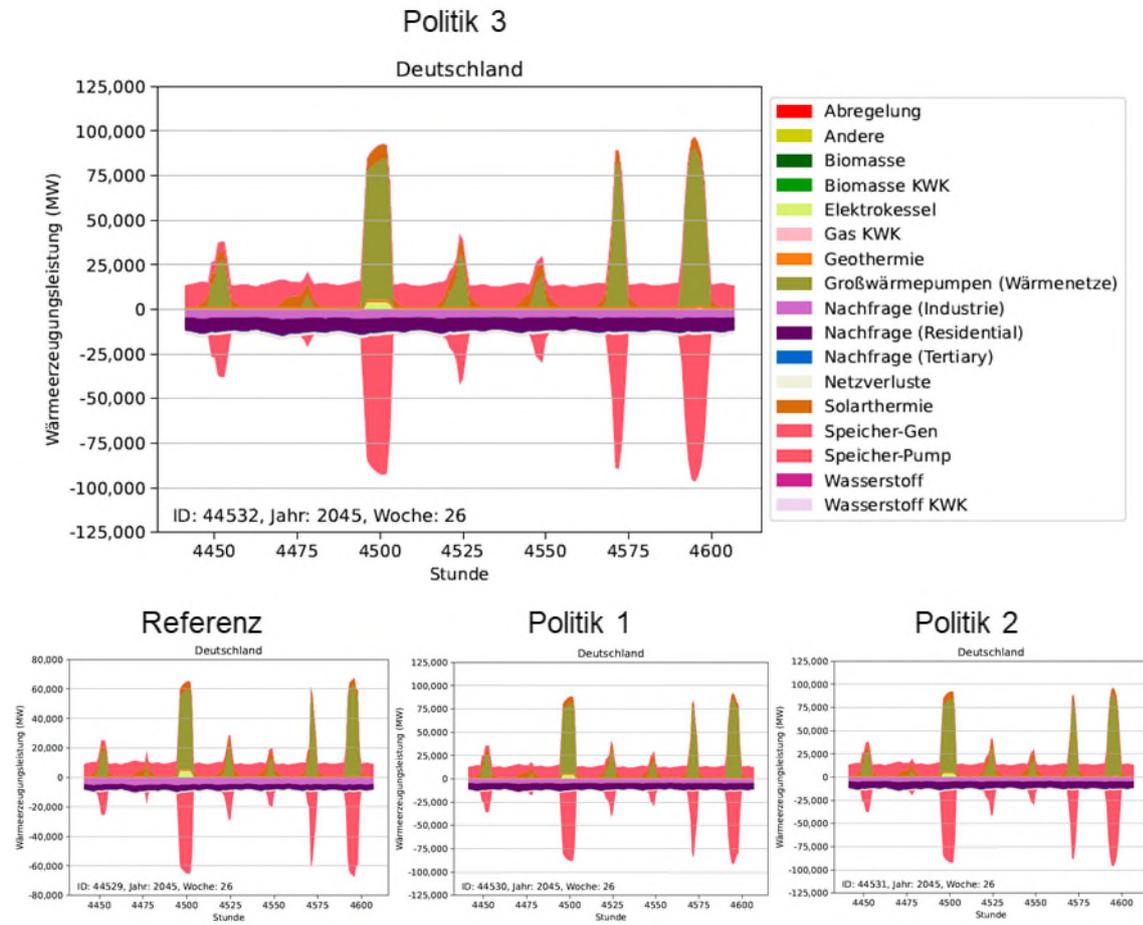
Abbildung 46: Dispatch Wärmenetze Winter (Deutschland, 2045)



Quelle: Fraunhofer ISI

Im Sommer ist wie zu erwarten der Wärmebedarf in den Fernwärmenetzen deutlich geringer als im Winter. Starke Stromerzeugungsspitzen der PV sind ebenfalls in der Wärmeproduktion der Großwärmepumpen zu erkennen. Die so erzeugte Wärme wird fast vollständig im Wärmespeicher zwischengespeichert. Nachts, wenn es keinen PV-Strom gibt, werden die zuvor gefüllten Wärmespeicher dann nach und nach entleert. Zusätzlich leisten Solar- und Geothermie einen kleinen Beitrag zur Wärmeerzeugung, der aufgrund der niedrigeren Nachfrage im Sommer höher ausfällt als im Winter. Folglich stellen Großwärmepumpen und Wärmespeichersysteme im Sommer den größten Teil der Wärmeversorgung in Fernwärmenetzen. Solarthermie ergänzt in kleinen Teilen, während Wasserstoff im Sommer keine Rolle spielt.

Abbildung 47: Dispatch Wärmenetze Sommer (Deutschland, 2045)



Quelle: Fraunhofer ISI

6 **Abbildungsverzeichnis**

Abbildung 1: Modellschnittstellen und Modellintegration in Manifold.....	7
Abbildung 2: Parametrisierung Invert/ee-lab mit SLICK Ergebnissen.....	11
Abbildung 3: Entwicklung der THG-Emissionen und Zielsetzung Gebäudesektor nach Klimaschutzgesetz.....	15
Abbildung 4: Berücksichtigte Dimensionen bei der Instrumentendefinition in der Szenarienmodellierung	16
Abbildung 5: Definition der untersuchten Politikszenerien.....	16
Abbildung 6: Entwicklung der Akzeptanz in der Gesamtpopulation in den drei Szenarien.....	27
Abbildung 7: Anteil der positiven und negativen Einstellung pro Gruppe in den drei Szenarien	28
Abbildung 8: Szenario Technologieoffenheit: Änderung der Akzeptanz zwischen von ursprünglichem Wert (Tick 0) und nach Modelllauf (Tick 150) für die Agenten nach Klassenzugehörigkeit.....	30
Abbildung 9: Szenario Technologieoffenheit: Änderung der Einstellung zu Effektivität, Fairness und Belastung der Politikmaßnahme zwischen von ursprünglichem Wert (Tick 0) und nach Modelllauf (Tick 150) für die Agenten nach Klassenzugehörigkeit.....	30
Abbildung 10: Szenario PP1: Änderung der Akzeptanz zwischen von ursprünglichem Wert (Tick 0) und nach Modelllauf (Tick 150) für die Agenten nach Klassenzugehörigkeit.....	31
Abbildung 11: Szenario PP1: Änderung der Einstellung zu Effektivität, Fairness und Belastung der Politikmaßnahme zwischen von ursprünglichem Wert (Tick 0) und nach Modelllauf (Tick 150) für die Agenten nach Klassenzugehörigkeit.....	32
Abbildung 12: Szenario PP2: Änderung der Akzeptanz zwischen von ursprünglichem Wert (Tick 0) und nach Modelllauf (Tick 150) für die Agenten nach Klassenzugehörigkeit.....	33
Abbildung 13: Szenario PP2: Änderung der Einstellung zu Effektivität, Fairness und Belastung der Politikmaßnahme zwischen von ursprünglichem Wert (Tick 0) und nach Modelllauf (Tick 150) für die Agenten nach Klassenzugehörigkeit.....	33
Abbildung 14: Entwicklung des Endenergieverbrauchs im Gebäudesektor und im Manifoldbereich im Referenzszenario.....	57
Abbildung 15: Entwicklung der Marktanteile der Wärmeversorgungssysteme im Referenzszenario.....	58
Abbildung 16: Entwicklung der Marktanteile der Wärmeversorgungssysteme im Szenario S1- Technologieoffenheit.....	58
Abbildung 17: Entwicklung des Endenergieverbrauchs der Haushalte nach Szenario.....	60

Abbildung 18: Entwicklung der THG-Emissionen der Haushalte nach Szenario und Urbanisierung.....	60
Abbildung 19: Entwicklung des Endenergieverbrauchs der Haushalte für Raumwärme und Warmwasser nach Szenario und Gebäudetyp	61
Abbildung 20: Energetische Sanierung der Wohngebäude nach Szenario und Einkommensgruppen.....	62
Abbildung 21: Anzahl installierter Wärmepumpen bei den Haushalten nach Szenario und Wohnverhältnis	63
Abbildung 22: Verteilung Fernwärmenutzung nach Szenario und Einkommensgruppen.....	64
Abbildung 23: Entwicklung des Heizsystembestands in den betrachteten Szenarien	66
Abbildung 24: Energiebedingte CO ₂ -Emissionen in den einzelnen Sektoren.....	67
Abbildung 25: Endenergienachfrage im Gebäudesektor.....	68
Abbildung 26: Energetische Sanierung der Gebäude.....	69
Abbildung 27: Bereitstellung und Verwendung von Fernwärme in den Szenarien in REMod	70
Abbildung 28: Primär und Endenergie in den Szenarien	71
Abbildung 29: Bereitstellung und Verwendung von Strom	73
Abbildung 30: Importe synthetischer Energieträger in den Szenarien.....	74
Abbildung 31: Heimische installierte Leistung von Power-2-X Technologien.....	75
Abbildung 32: Bereitstellung und Verwendung von Wasserstoff.....	76
Abbildung 33: Bereitstellung und Verwendung von Gas	77
Abbildung 34: Verwendung von fester Biomasse	78
Abbildung 35: Entwicklung der Stromnachfrage in Deutschland	80
Abbildung 36: Entwicklung der Stromnachfrage für die Wärmeerzeugung in Deutschland.....	81
Abbildung 37: Entwicklung des Fernwärmebedarfs in Deutschland.....	82
Abbildung 38: Entwicklung der Stromerzeugungsleistung in Deutschland.....	84
Abbildung 39: Entwicklung der Stromerzeugung in Deutschland.....	84
Abbildung 40: Entwicklung der Stromerzeugungsleistung in Europa.....	85
Abbildung 41: Entwicklung der Stromerzeugung in Europa.....	85
Abbildung 42: Europäischer Stromhandel im Jahr 2045.....	87
Abbildung 43: Entwicklung der Fernwärmeerzeugung in Deutschland.....	89
Abbildung 44: Dispatch Stromsystem Winter (Deutschland, 2045)	90
Abbildung 45: Dispatch Stromsystem Sommer (Deutschland, 2045).....	91
Abbildung 46: Dispatch Wärmenetze Winter (Deutschland, 2045).....	92
Abbildung 47: Dispatch Wärmenetze Sommer (Deutschland, 2045).....	93
Abbildung 48: 99	

7 Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Ausprägung der Gewichtungparameter (beta-values) in Invert/ee-lab basierend auf dem DCE.....	9
Tabelle 2: Annahme von drei politischen Szenarien für den Bereich Wärme.....	18
Tabelle 3: Zentrale Instrumente und Wirkdimension entsprechend des Manifold-Ansatzes	19
Tabelle 4: Zentrale Instrumente und Wirkdimension entsprechend des Manifold-Ansatzes	20
Tabelle 5: Zentrale Instrumente und Wirkdimension entsprechend des Manifold-Ansatzes	22
Tabelle 6: Zentrale Instrumente und Wirkdimension entsprechend des Manifold-Ansatzes	23
Tabelle 7: Vignetten-Experiment – Mögliche Ausprägungen der politischen Maßnahme	25
Tabelle 8: Zuordnung der Politikmaßnahmen Attribute zu den Politikszenerien.....	26
Tabelle 9: Annahmen zur Verwendung einzelner Energieträger im Jahr 2045	65
Tabelle 10: Anteile der Endenergieträger im heutigen System und in den unterschiedlichen Szenarien.....	72

8 Literaturverzeichnis

- Funke, S. Á.; Plötz, P. (2017): A techno-economic analysis of fast charging needs in Germany for different ranges of battery electric vehicles. In: Proceedings to the European Electric Vehicle Congress (EEVC), 14th – 16th March 2017, Geneva, Switzerland.
- Héraud, J.-A. (2003): Regional Innovation Systems and European Research Policy: Convergence or Misunderstanding? In: *European Planning Studies*, 11 (1), S. 41-56.
- Hodbod, J.; Adger, W.N. Integrating social-ecological dynamics and resilience into energy systems research. *Energy Res. Soc. Sci.* 2014, 1, 226–231
- Funke, S. Á.; Plötz, P. (2017): A techno-economic analysis of fast charging needs in Germany for different ranges of battery electric vehicles. In: Proceedings to the European Electric Vehicle Congress (EEVC), 14th – 16th March 2017, Geneva, Switzerland.
- Kim, S.-M., Kim, J.-H. (2020): Households' Willingness to Pay for Substituting Natural Gas with Renewable Methane: A Contingent Valuation Experiment in South Korea. In: *Energies*
- Numata, M.; Sugiyama, M.; Swe, W.; del Barrio Alvarez, D. Willingness to Pay for Renewable Energy in Myanmar: Energy Source Preference. *Energies* 2021, 14, 1505.
<https://doi.org/10.3390/en14051505>
- Pfenninger, S.; Hawkes, A.; Keirstead, J. Energy systems modeling for twenty-first century energy challenges. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 2014, 33, 74–86.
- Senkpiel, C., Dobbins, A., Kockel, C., Steinbach, J., Fahl, U., Wille, F., Globisch, J., Wassermann, S., Droste-Franke, B., Hauser, W., Hofer, C., Nolting, L., Bernath, C. (2020): Integrating Methods and Empirical Findings from Social and Behavioural Sciences into Energy System Models—Motivation and Possible Approaches. In: *Energies* 13, 4951.
<https://doi.org/10.3390/en13184951>
- Sovacool, B.K. Diversity: Energy studies need social science. *Nature* 2014, 511, 529–530.
- Toyota Deutschland GmbH (2015): Toyota Prius Plug-in Hybrid. Online verfügbar unter <http://www.toyota.de/automobile/prius-plugin/index.json>, zuletzt geprüft am 12.04.2015.
- Wietschel, M.; Gnann, T.; Kühn, A.; Plötz, P.; Moll, C.; Speth, D.; Buch, J. (2017): Mach-barkeitsstudie zur Ermittlung der Potentiale des Hybrid-Oberleitungs-Lkw. Studie im Rahmen der Wissenschaftlichen Beratung des BMVI zur Mobilitäts- und Kraftstoffstrategie. Karlsruhe: Fraunhofer ISI.