

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

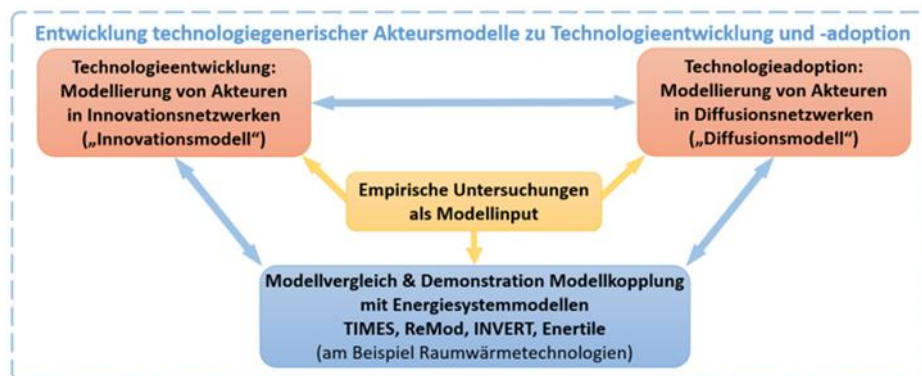
DCE	Discrete-Choice-Experiment
MANIFOLD	Modellentwicklung und Modellkopplung zu Akteursverhalten in Innovations- und Diffusionsnetzwerken
SLICK	Simulating Learning Curves via Knowledge modelling
TAM-HHs	TIMES Akteurs-Modell-Households

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?

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.

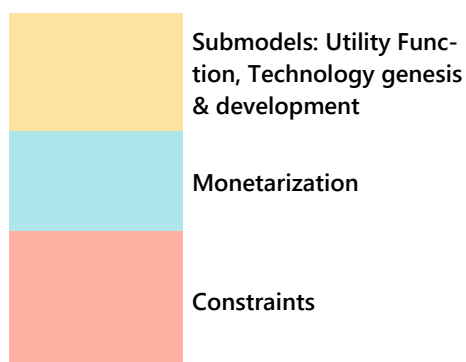
Der Fokus liegt dabei in der Forschung bislang darauf, wie das Investitionsverhalten der Akteure detailliert abgebildet werden kann. Der Schwerpunkt liegt dabei auf drei Kategorien: die Abbildung von Discrete-Choice-Experimenten, Umfrageergebnisse aus sozio-psychologischen Kategorien und die Abbildung 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
In- dustry and in- vestors	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 technoökonomischen 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.

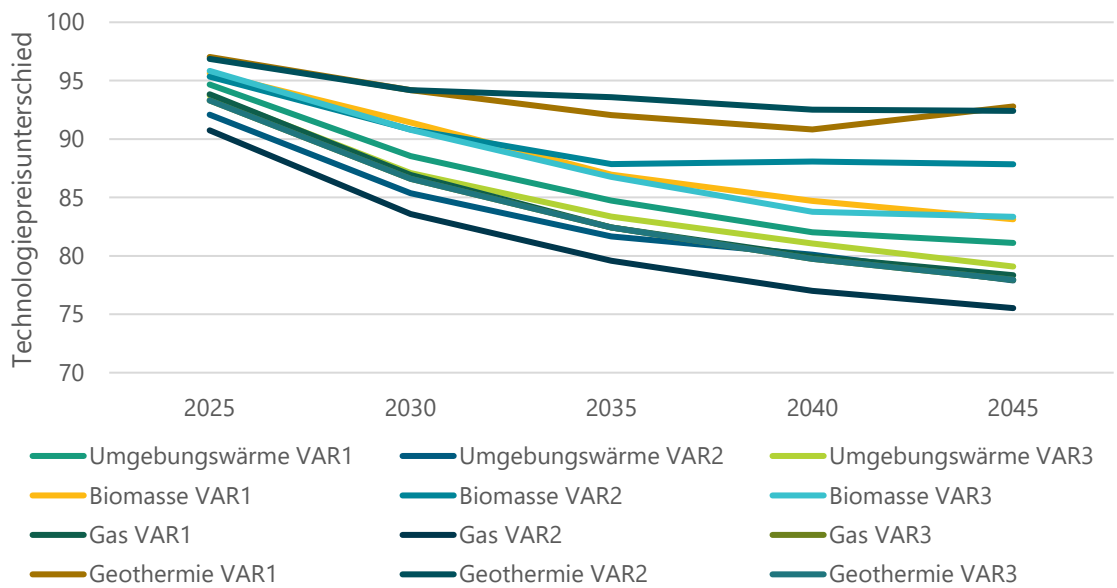
3.2 Integration der SLICK-Ergebnisse in TAM-HHs

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

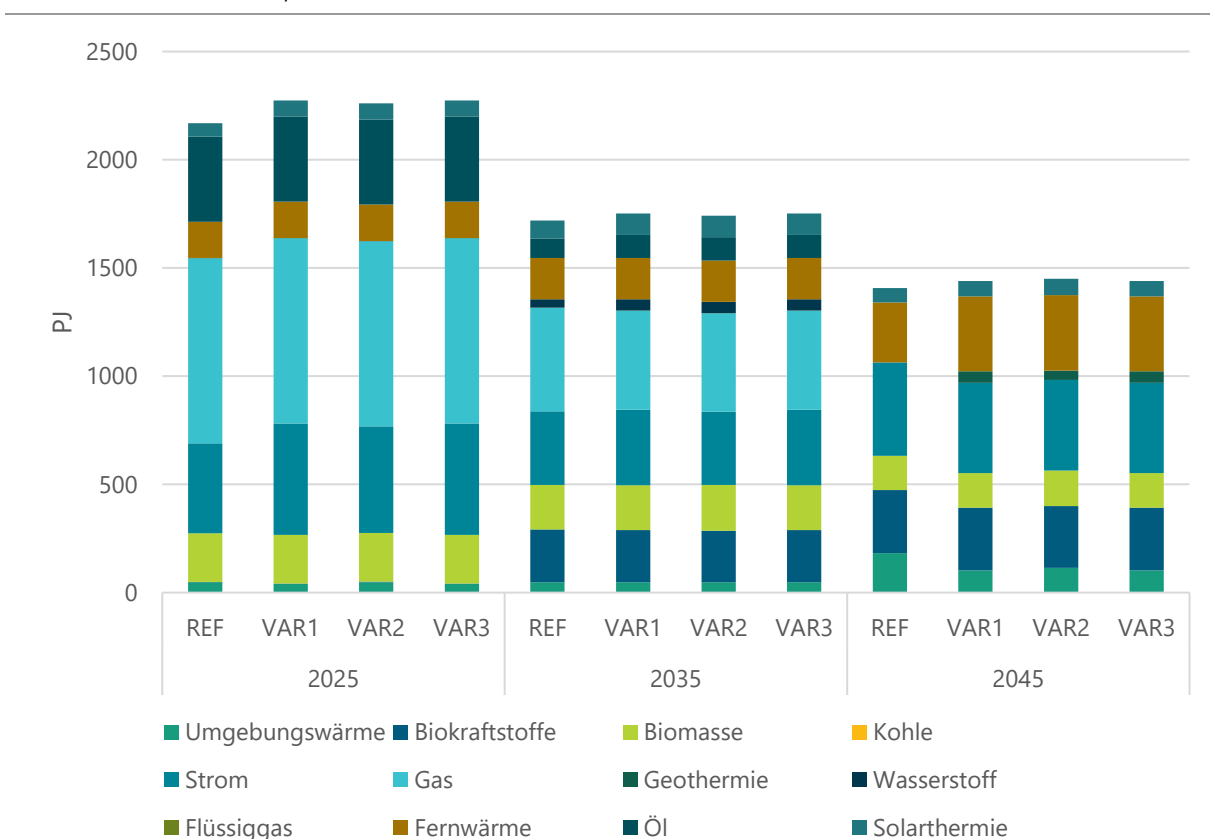
Abbildung 3: Technologieunterschiede nach Szenario



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



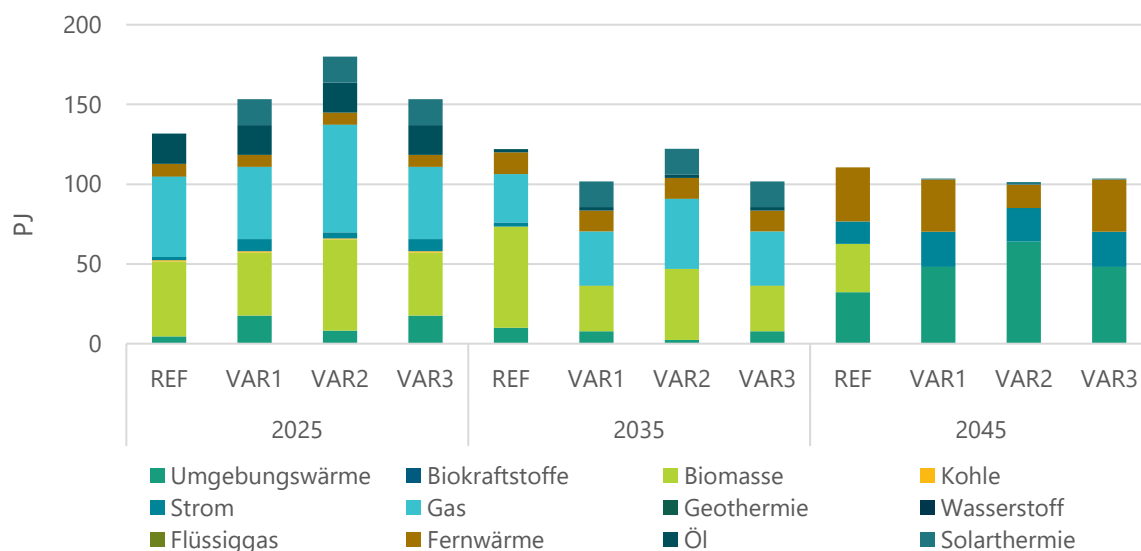
Endenergieverbrauch für Raumwärme und Warmwasser

In TAM-HHs kann auch der Einfluss derartiger Veränderungen bei den Technologiepreisen auf einzelne Haushaltgruppen 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

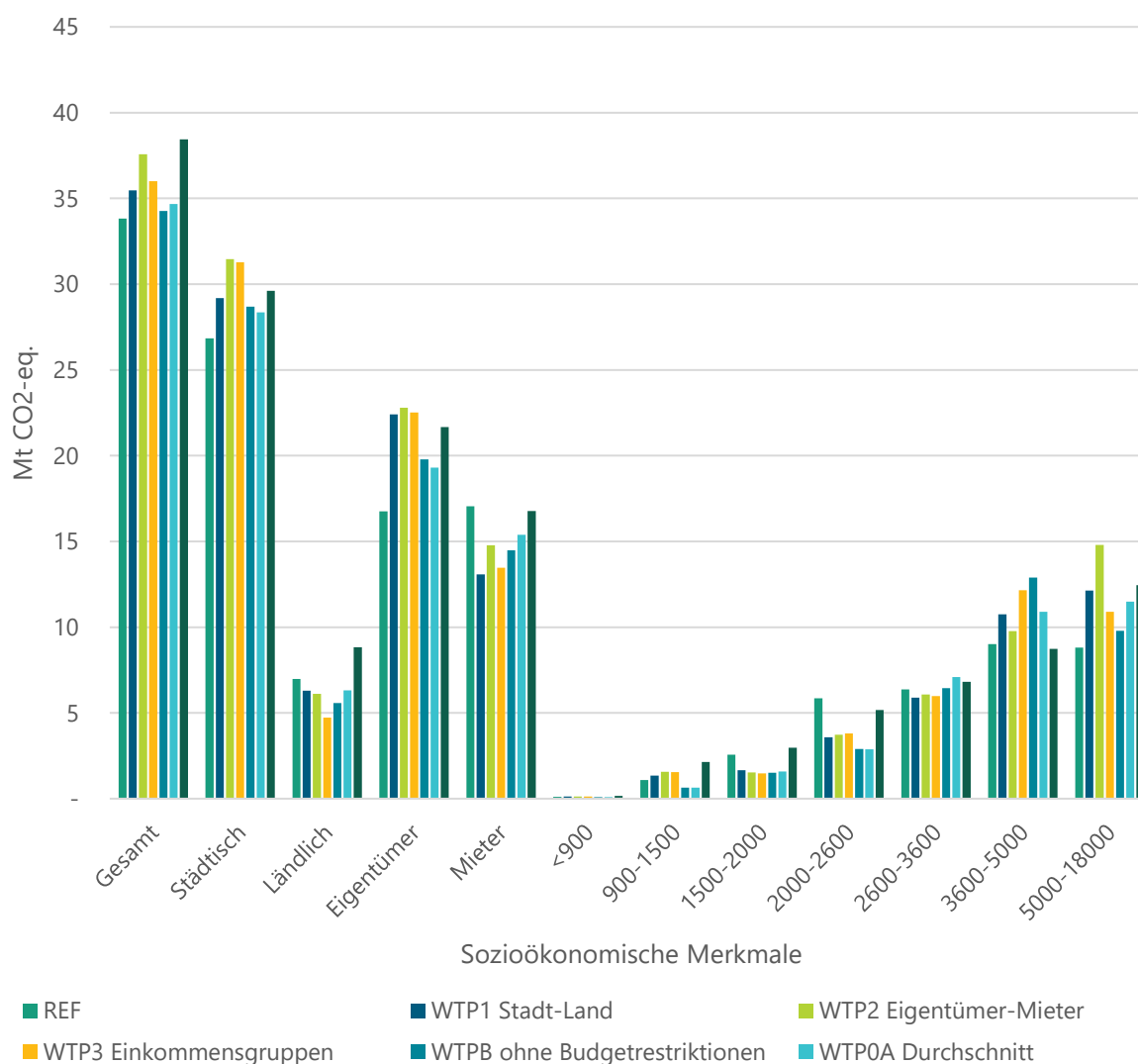
Im Modell TAM-HHs, in dem eine Disaggregation der Akteure vorhanden ist, werden diese soziodemographischen Faktoren modellendogen mitberücksichtigt. Grundsätzlich wird z. B. die Willingness-to-pay (WTP) nach diesen Merkmalen zusammen mit der methodischen Erweiterung der Energiesystemoptimierungsmodell-Methodik 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

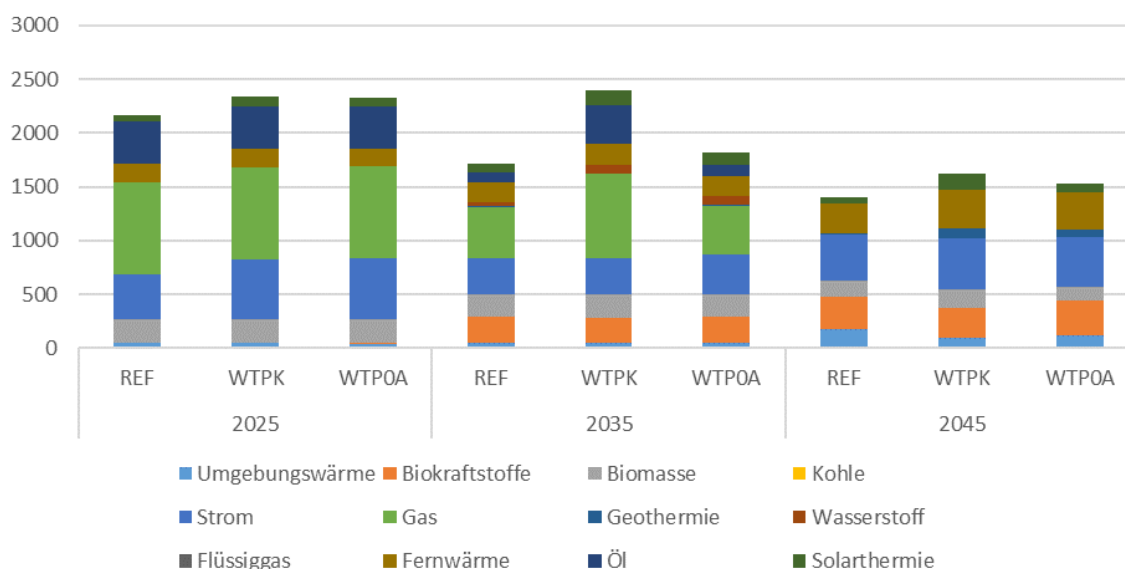


Einfluss der Diskontrate (WTPK) auf den gesamten Endenergieverbrauch der Haushalte

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).

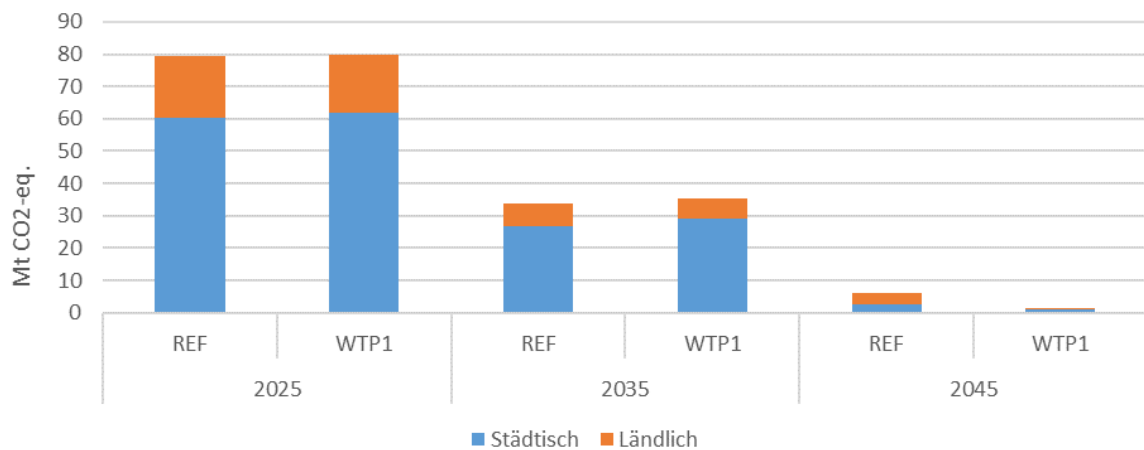
Abbildung 7: Einfluss des Diskontsatzes auf den Endenergieverbrauch der Haushalte nach Energieträgern im Referenzszenario (REF) und im WTPK-Szenario mit einem niedrigeren Diskontsatz sowie dem WTP0A-Szenario mit Integration einer durchschnittlichen Willingness-to-Pay



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.

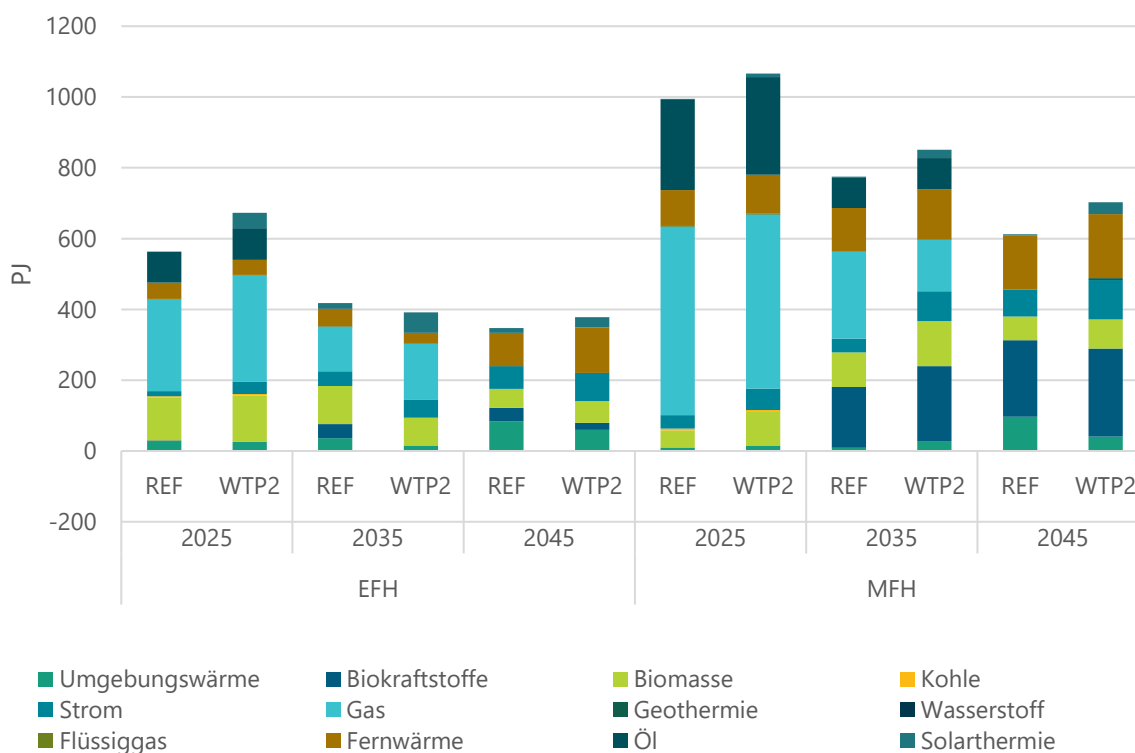
Abbildung 8: CO₂-Emissionen der Haushalte im Referenzszenario im Vergleich mit dem Szenario unter Berücksichtigung der sozioökonomischen Parameter der Zahlungsbereitschaft für städtische und ländliche Haushalte (WTP1)



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.

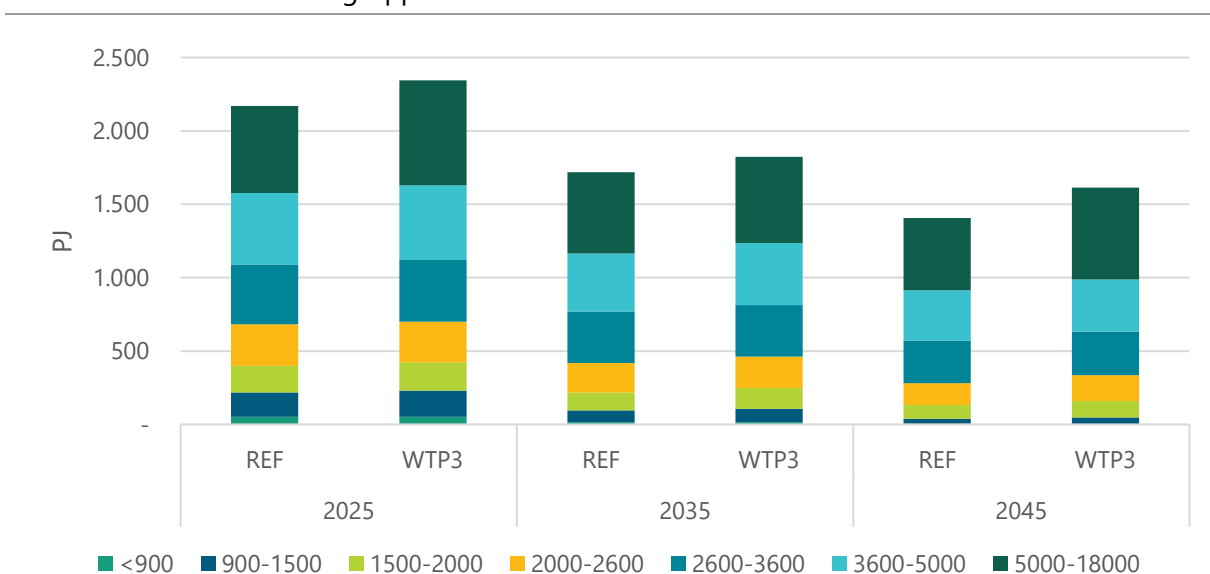
Abbildung 9: Einfluss der Zahlungsbereitschaft in EFH und MFH auf den Endenergieverbrauch der Haushalte für Raumwärme und Warmwasser nach Brennstoffart



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.

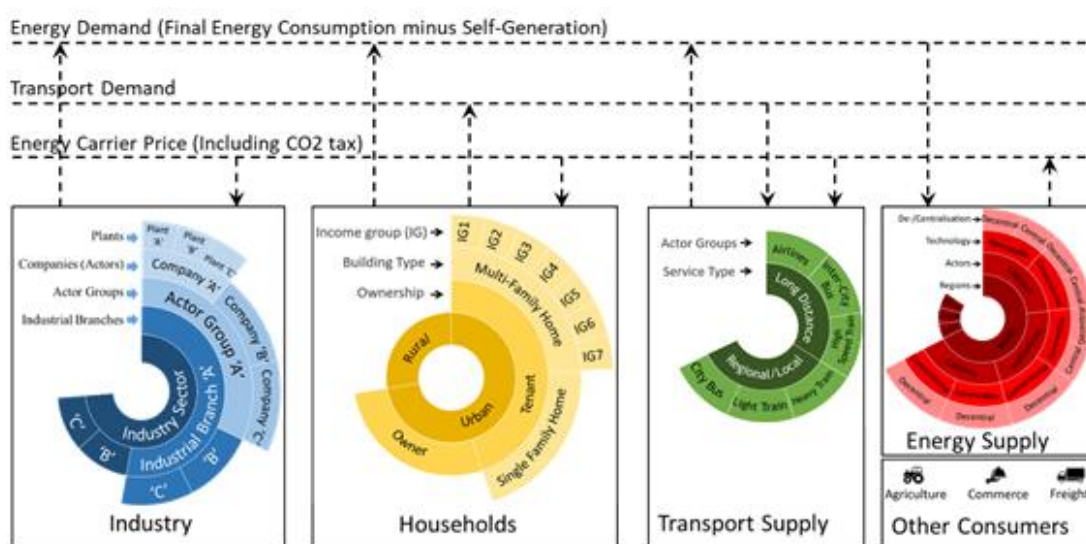
Für einen weiteren Vergleich der Modellierungsergebnisse wurden die drei Varianten der Innovationsmodell SLICK mit den Erkenntnissen aus den DCE-Experimenten zur Zahlungsbereitschaft kombiniert. Hier erfolgt die weitere Modellierung mit einer gemittelten Zahlungsbereitschaft und kombiniert mit Erkenntnissen 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 dominiert. Dadurch flacht die Lernkurve mit der Zeit ab (Abbildung 14 rechts), ein Effekt, der auch in gemessenen Lernkurven beobachtet wurde.

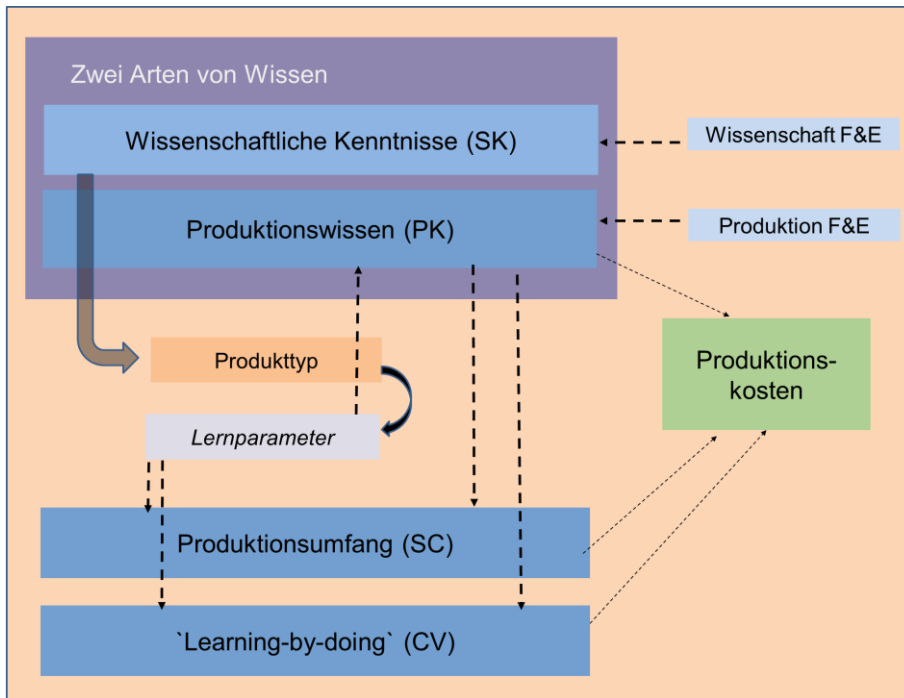


Abbildung 13: Schematische Darstellung des Lernkurven-Moduls

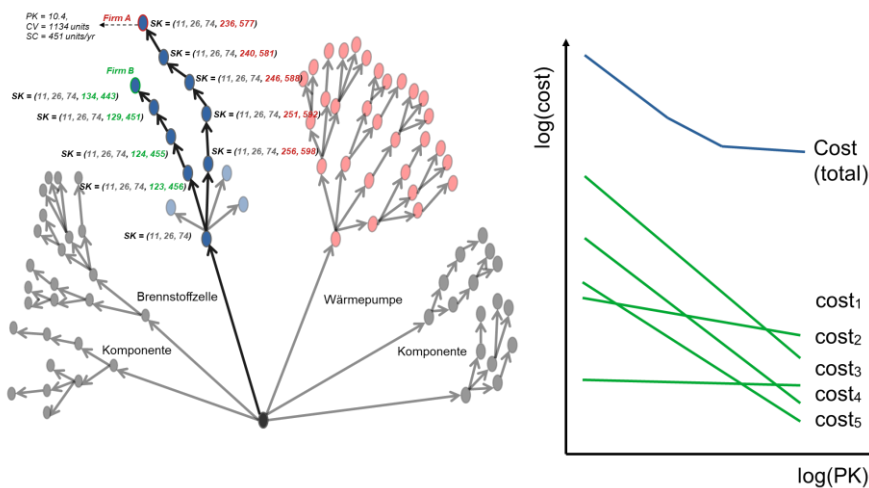


Abbildung 14: Beispiel Technologie- & Kostentwicklung

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.

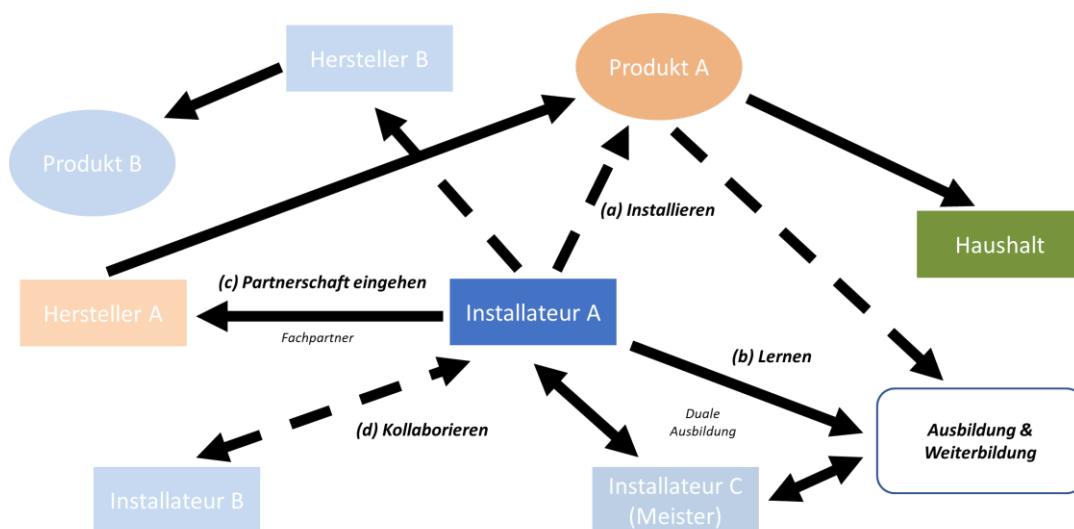


Abbildung 15: Schematische Darstellung des Installateur-Moduls

Die Darstellung der Szenarien erfolgt im Anhang A.2.

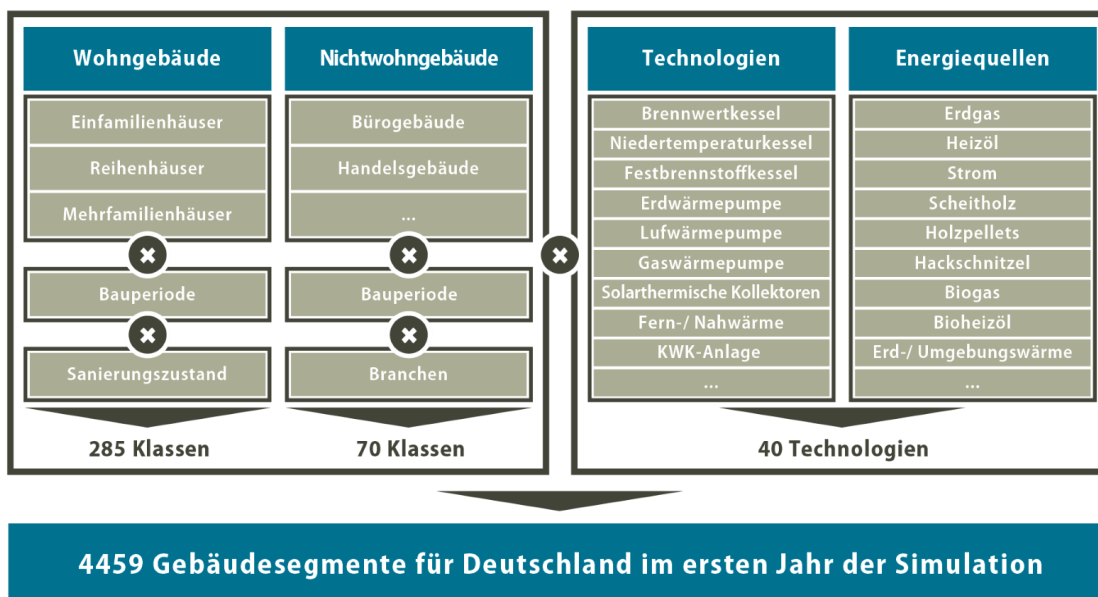


Abbildung 16: Struktur der hinterlegten Gebäudetypologie in Invert/EE-Lab

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.

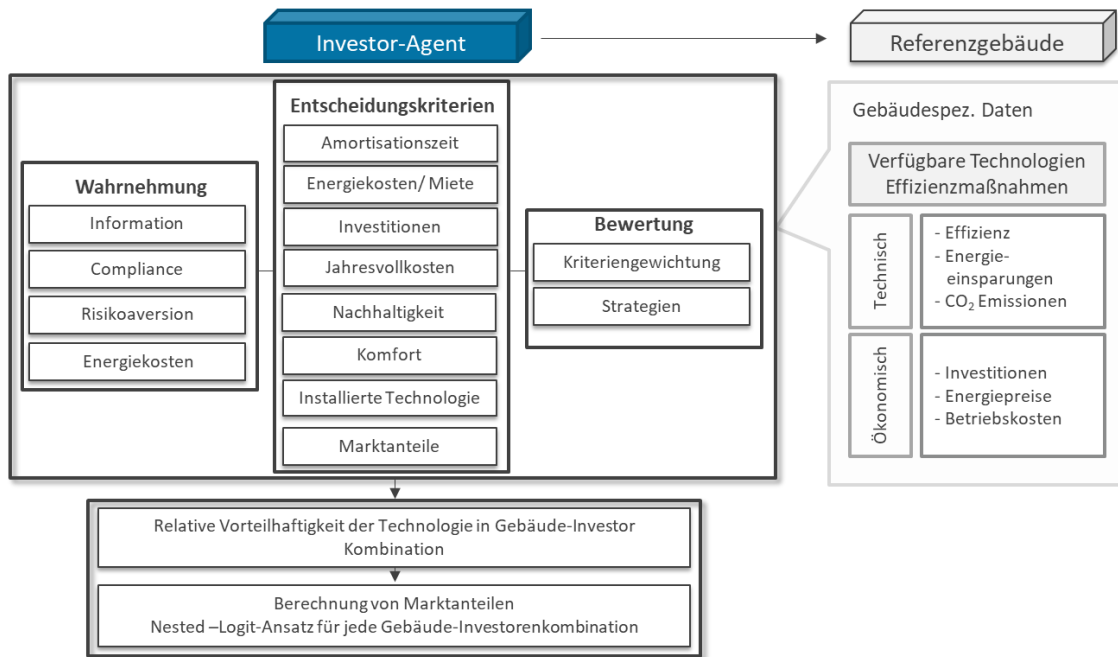


Abbildung 17: Modellierung der Gebäudeeigentümer als Investor-Agenten

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.