

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@eoner.rwth-aachen.de; Lars Nolting, lars.nolting@eoner.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.

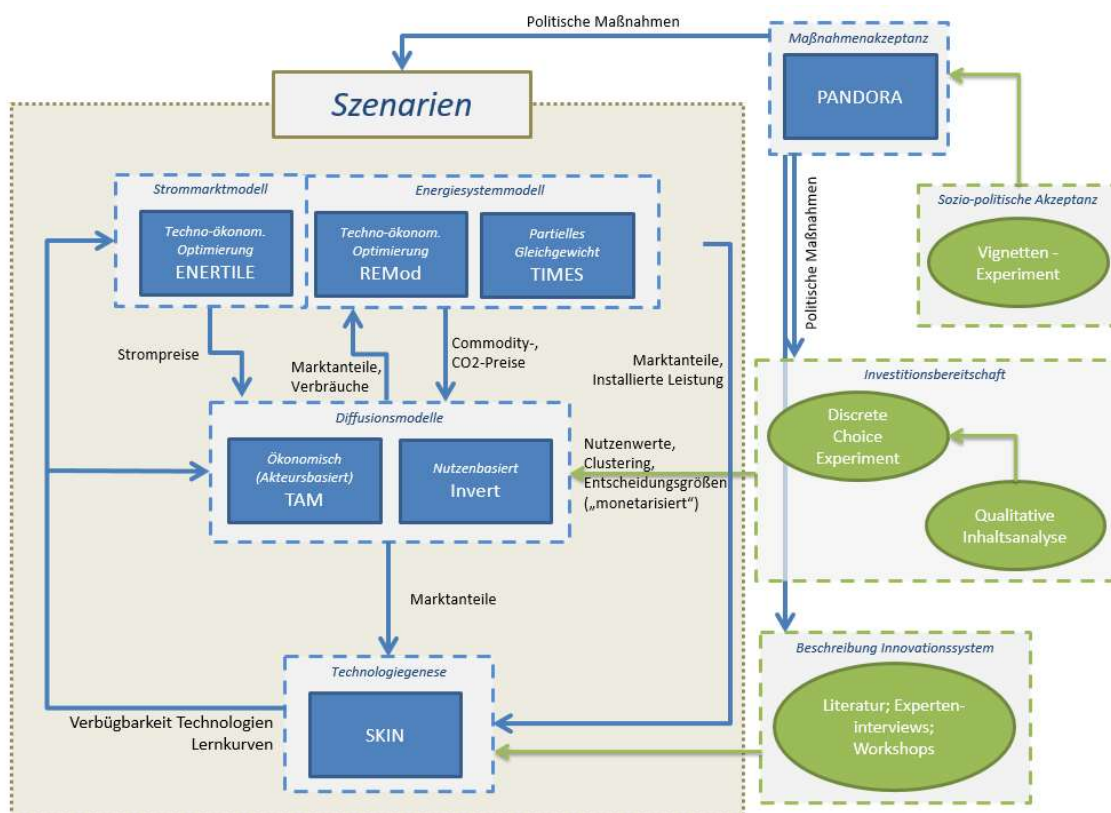
Inhaltsverzeichnis

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.

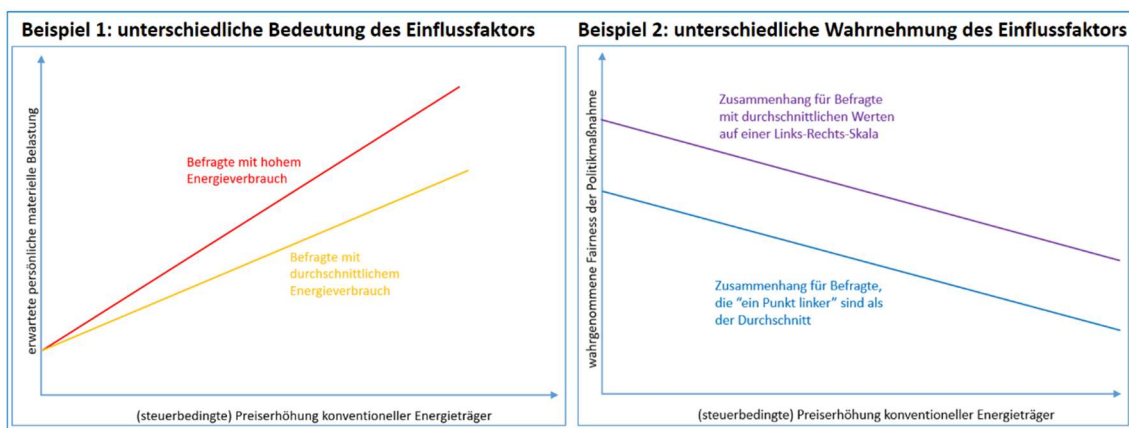
Zur Erfassung der sozio-politischen Akzeptanz wurden die Befragten gebeten, bei jeder Vignette anzugeben, inwieweit sie die Politikmaßnahme befürworten oder ablehnen. Um den Einfluss sozialer Normen auf die sozio-politische Akzeptanz untersuchen zu können, wurde zudem gefragt, welche Reaktionen auf die 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.

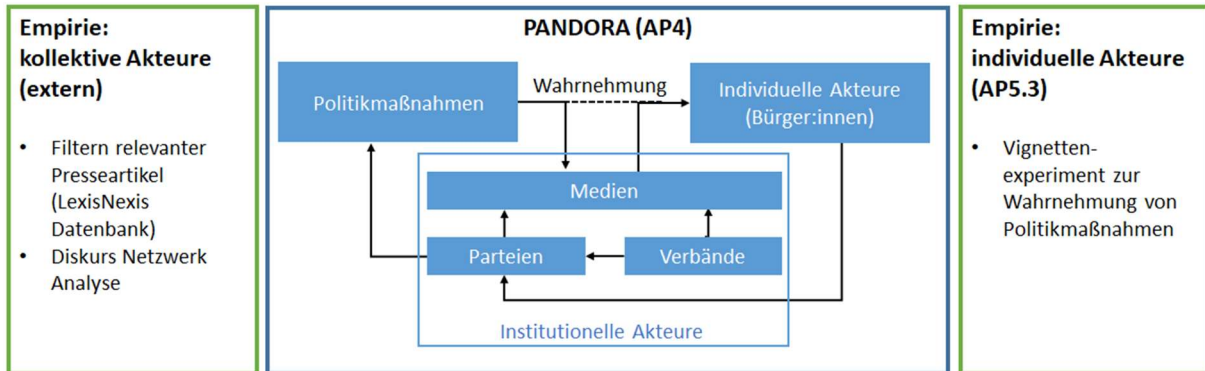
Die konzeptionelle Entwicklung von PANDORA erfolgt in weiten Teilen analog zur Konzipierung des oben beschriebenen Vignetten-Experiments, sodass die Ergebnisse aus der empirischen Untersuchung direkt als Input in das Modell integriert werden können.

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 **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden..**

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 technologiepolitischer 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

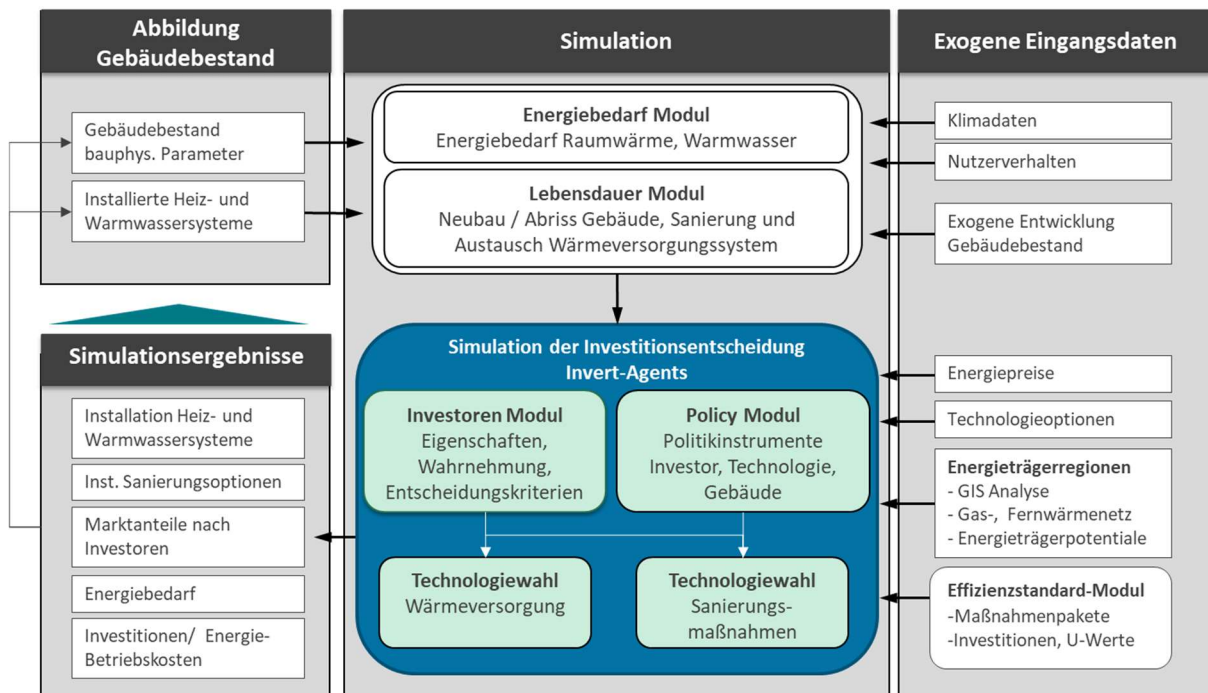
Methodisch stellt INVERT/EE-Lab ein dem Bottom-up-Ansatz folgendes, techno-ökonomisches Simulationsmodell dar, mit dem Optionen des Energiebedarfs und dessen Deckung für Wärme (Raumwärme und Warmwasser) sowie Klimatisierung von Wohn- und Nichtwohngebäuden ermittelt und die Auswirkungen verschiedener 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.

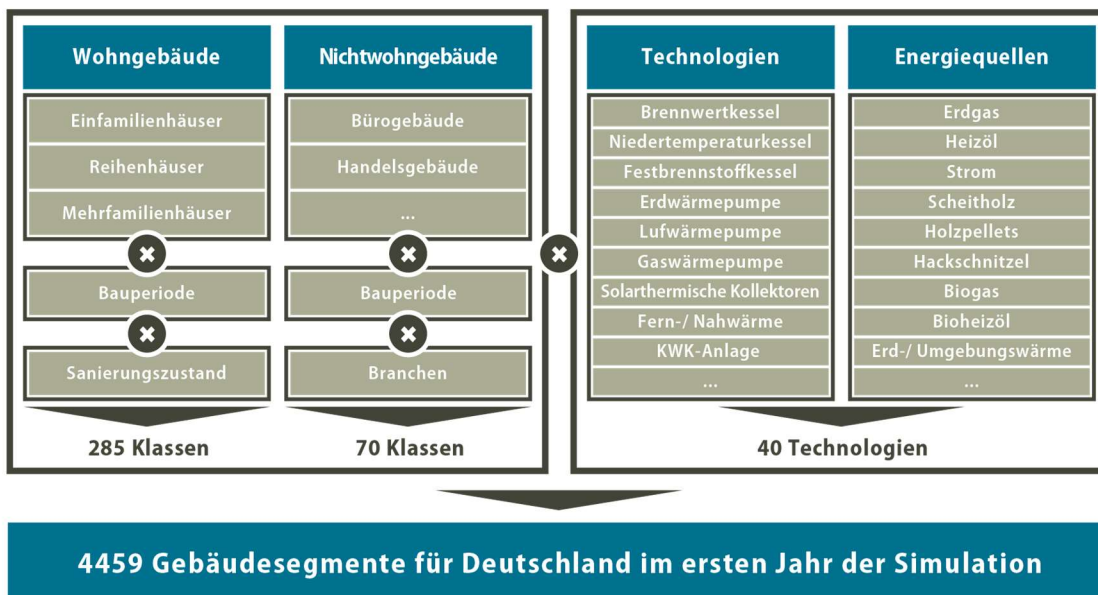
Abbildung 4: Struktur des Simulationsmodells Invert/EE-Lab (Quelle: Steinbach 2015)



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.

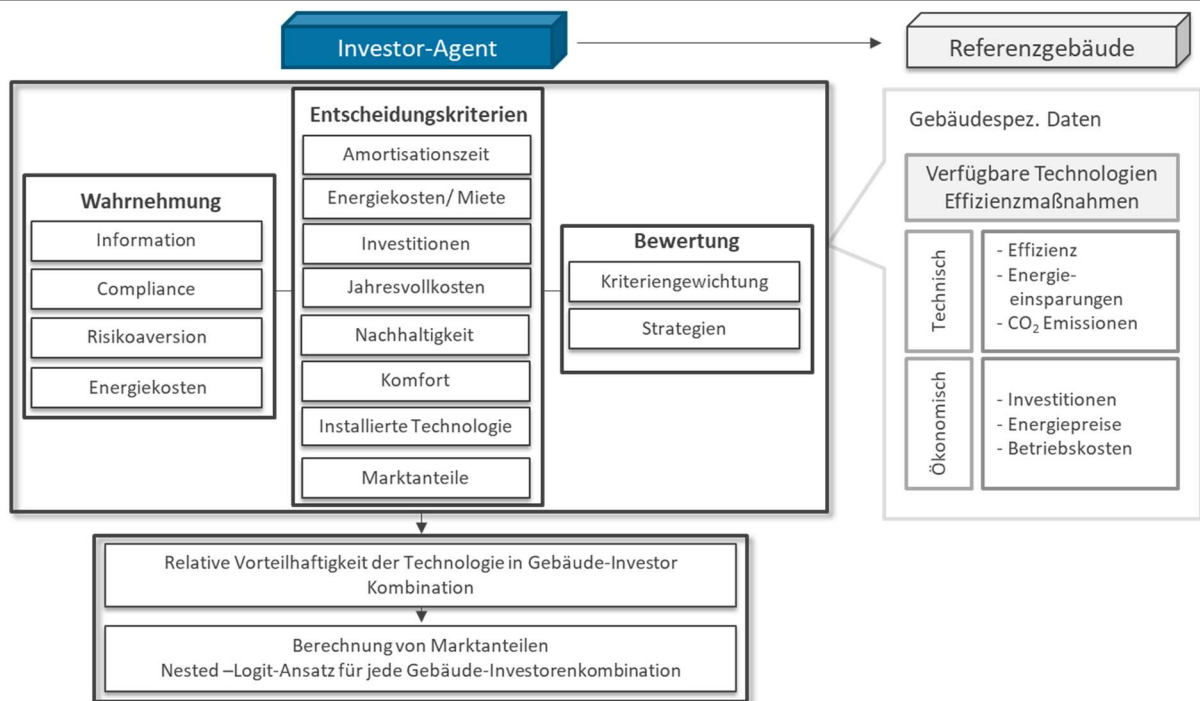
Abbildung 5: Struktur der hinterlegten Gebäudetypologie in Invert/ EE-Lab



Modellierung von Investoren im Gebäudebereich

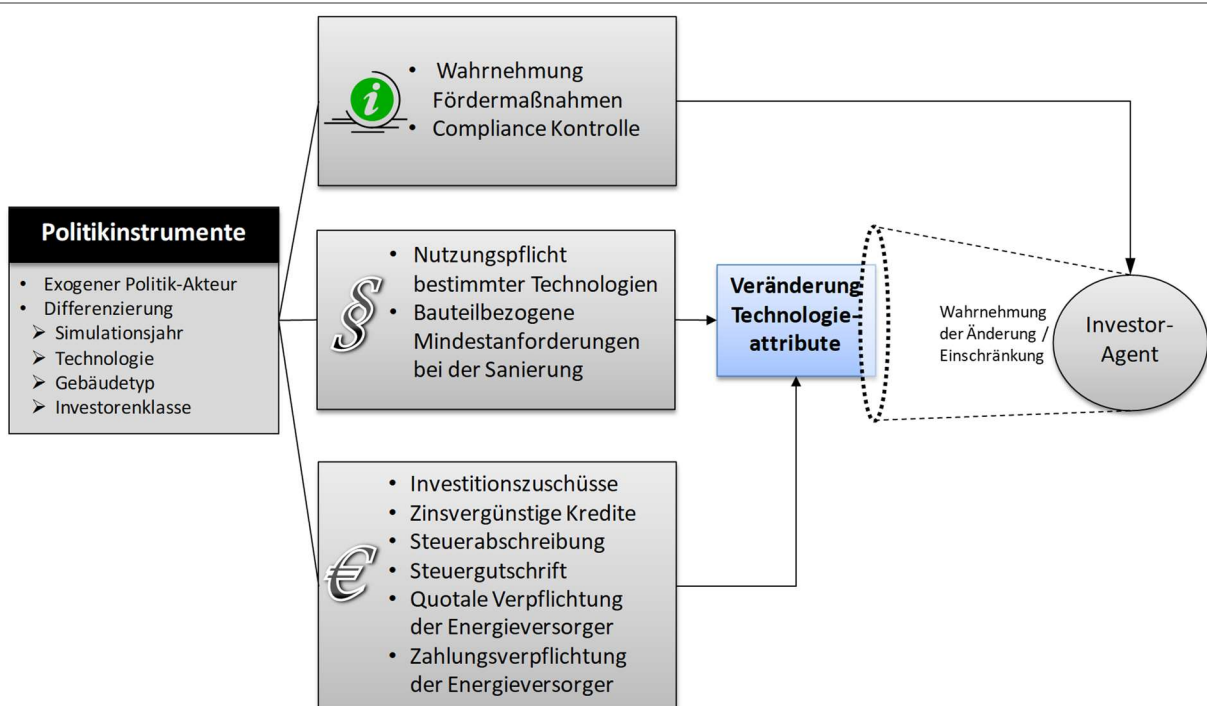
Im Modell können einzelne Investorentypen implementiert werden, welche den Referenzgebäude-segmenten anteilig als Besitzer zugeordnet werden. Diese Anteile sind zeitabhängig und können somit exogen über den Simulationszeitraum verändert werden. Das Modell erlaubt die Definition beliebig vieler Investorenagenten, 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, Referenzgebäude-segmenten 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 Referenzgebäude-segment 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 aktorspezifische 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.

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

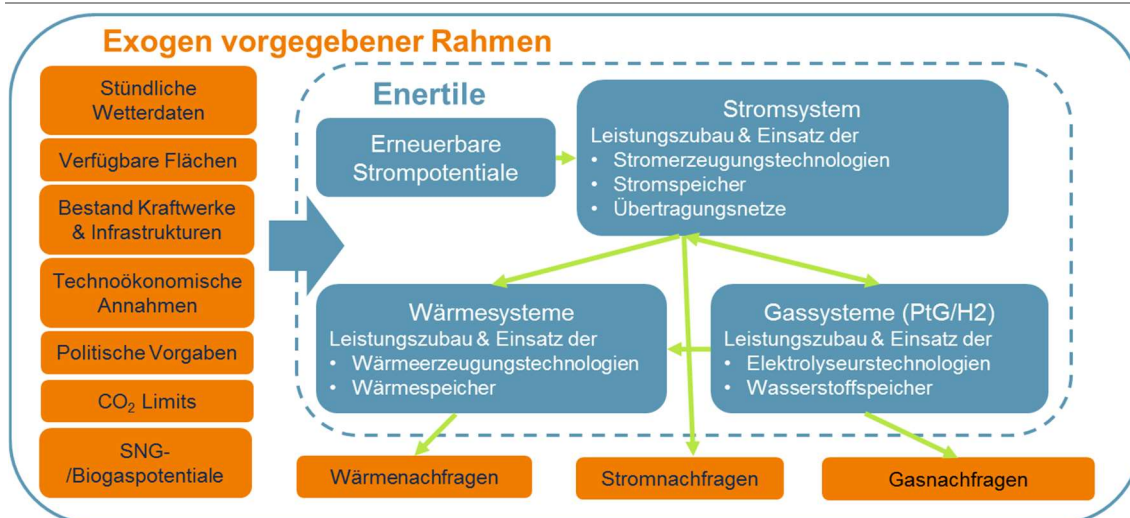
Energienachfragen, auf größere, zusammenhängende Modellregionen aggregiert, die sich an Netzengpässen im Stromübertragungsnetz und den Nationalstaaten orientieren. Innerhalb einer Modellregion findet innerhalb eines Modelllaufs keine weitere regionale Differenzierung statt.

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.

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.

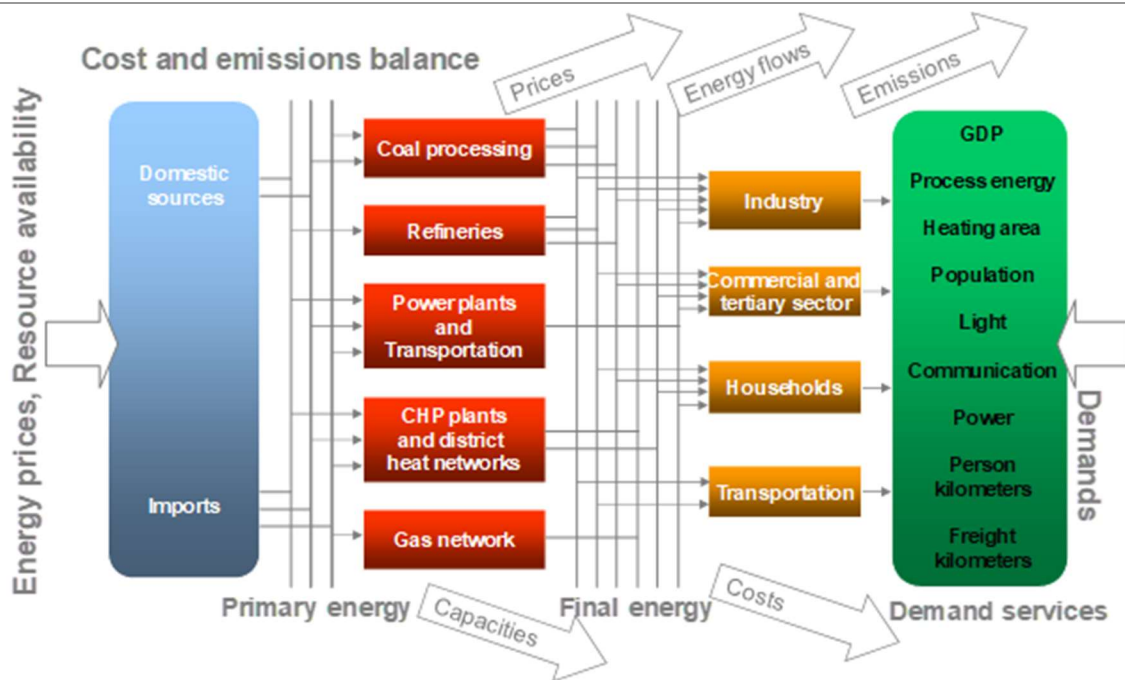
Ziel ist die Ermittlung der wirtschaftlich optimalen Struktur des Energiesystems bei einem vorzugebenden Nutzenergie- bzw. Energiedienstleistungsbedarf und ggf. energie- und umweltpolitischen Vorgaben. Hierzu erfolgt eine Minimierung der diskontierten Aufwendungen des Energiesystems, wobei jedoch die 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.