

Davy van Doren, Bert Droste-Franke, Markus Voge

Nutzen und Herausforderungen agentenbasierter Modellierung für die Politikberatung am Beispiel von Installateur*innen im Wärmebereich

1. Einleitung

In den letzten 150 Jahren hat sich der Energiesektor zum größten Verursacher globaler Treibhausgasemissionen entwickelt (International Energy Agency IEA 2025). Da derzeit etwa 75 % aller Emissionen – hauptsächlich aus der Verbrennung fossiler Brennstoffe – auf den Energiesektor entfallen, ist eine rasche Dekarbonisierung und die Nutzung erneuerbarer Energiequellen notwendig, um die Ziele des Pariser Abkommens einhalten zu können (Dimitrov 2016; Moomaw et al. 2011). Dafür werden erhebliche Investitionen in saubere Energietechnologien getätigt. Ziel ist es, den weltweit steigenden Energiebedarf zu decken und gleichzeitig die Umweltbelastung zu verringern. Darüber hinaus sind Investitionen erforderlich, um die Systemsicherheit zu gewährleisten und mit neuen Technologien verschiedene Systemfunktionen zu unterstützen. Vor allem zur Integration variabler und dezentraler erneuerbarer Energien sind unter anderem der Einsatz von Energiespeichern, Netzausbau und smarte Digitalisierung – zum Beispiel zur Steuerung von Anlagen für die gezielte und netzfreundliche Bereitstellung von Strom – erforderlich (Droste-Franke et al. 2025).

Es gibt jedoch ein wachsendes Bewusstsein dafür, dass es die Gestaltung einer erfolgreichen Energiewende erfordert, über rein technologiebasierte Überlegungen hinauszugehen (Markard/Hoffmann 2016). Die Energiewende umfasst im wesentlichen Maße auch zentrale nicht-technologische Aspekte einer nachhaltigen Entwicklung. Beispiele sind die Stärkung von Regionen, die Planung städtischer Energiesysteme, das soziotechnische Prozessmanagement und die Einbeziehung von Interessengruppen. Daher ist es notwendig die Energiewende aus mehrdimensionaler Perspektiven zu betrachten.

Ein Beispiel hierfür ist das wachsende Bewusstsein für die begrenzte Verfügbarkeit von Fachkräften, die in der Lage sind, verbesserte Technologien zu installieren und Energieinfrastrukturen zu modernisieren, damit die Verbreitung nachhaltiger Innovationen zu fördern und die Energiewende voranzutreiben (Owen et al. 2014). Da Installateur*innen eine zentrale Vermittlerposition zwischen Tech-

nologieherstellern und Endnutzer*innen einnehmen – in Kombination mit der Dringlichkeit, den bestehenden Fachkräftemangel zu beheben – ist das Verständnis der zugrunde liegenden Prozesse solcher Akteursgruppen von entscheidender Bedeutung, um die komplexe Interaktion von Prozessen auf mehreren Ebenen anzugehen und angemessen zu bewerten, wie Maßnahmen und wirksame Strategien am besten koordiniert werden können.

In diesem Beitrag heben wir den Wert und die Grenzen bestehender Energiesystemmodelle hervor und zeigen auf, wie spezifische sozio-technische Prozesse in Bezug auf die Dynamik der Verfügbarkeit geeigneter Installateur*innen integriert werden könnten, um die Realitätsnähe von Szenarioprognosen zu verbessern. Anhand eines agentenbasierten Modells im Kontext der Verbreitung von Heiztechnologien – mit besonderem Augenmerk auf Aus- und Weiterbildungssysteme sowie Installateur*in-Firmen-Konstellationen – untersuchen wir auf der Grundlage verschiedener definierter Szenarien unterschiedliche politische Maßnahmen. Wir schließen mit einer Diskussion der erarbeiteten Ergebnisse und erläutern identifizierte Einschränkungen. Zudem werden zukünftige Forschungsbedarfe vorgestellt und über den potenziellen Nutzen modularisierter Innovationssystemmodelle für die Politikberatung reflektiert.

2. Integration soziotechnischer Dynamiken in Energiesystemmodelle

In Bezug auf die Energiewende wird allgemein anerkannt, dass die technologische Innovation eine zentrale Stellung einnimmt, aber auch, dass Modelle erforderlich sind, um deren unterstützende Rollen und Funktionsweisen zu verstehen und zu steuern (Bolwig et al., 2019; Crespo del Granado et al. 2018; Khan et al. 2022). Die Modellierung soziotechnischer Dynamiken in Energiesystemen hat zunehmend an Aufmerksamkeit gewonnen, da der Übergang zu nachhaltiger Energie nicht nur das Verständnis technischer und wirtschaftlicher Faktoren, sondern auch der Rollen und Verhaltensweisen verschiedener Akteur*innen innerhalb der Innovationssysteme erfordert (Markard/Hoffmann 2016). Während bei traditionellen Energiesystemmodellen in erster Linie technische und wirtschaftliche Parameter – wie Technologiekosten, Energienachfrage und Emissionserzeugung – im Vordergrund standen, wird in der neueren Literatur die Notwendigkeit hervorgehoben, auch soziotechnische Faktoren einzubeziehen, um die Komplexität der realen Welt, die die Energiewende prägt, besser zu erfassen, einschließlich des Verhaltens heterogener Akteur*innen, institutioneller Kontexte und regulatorischer Auswirkungen (Liegl et al. 2023; Krumm et al. 2022). Solche

soziotechnischen Modellierungsansätze können somit realistischere Szenarioanalysen und bessere politische Bewertungen ermöglichen.

Installateur*innen können die Einführungsraten, die Qualität der Installation und die Akzeptanz bei den Verbraucher*innen beeinflussen und nehmen somit eine zentrale Stellung bei der Verbreitung und Übernahme von Energieinnovationen und der Entwicklung der damit verbundenen Märkte ein. Trotz dieser wahrgenommenen Bedeutung scheint die Darstellung von Installateur*innen in Energiesystemmodellen immer noch begrenzt zu sein. Die Technologieübernahme wird in den Modellen häufig als Funktion wirtschaftlicher Anreize oder der Verbraucher*innenpräferenzen behandelt, wobei die Installateur*innen häufig durch vereinfachte Annahmen oder durch Aggregation innerhalb breiterer Akteurskategorien berücksichtigt werden. Bei solchen Ansätzen werden potenzielle Auswirkungen spezifischer Dynamiken der Installateur*innen auf die Technologieverbreitung außer Acht gelassen, darunter Kapazitätserwerb, regionale Verfügbarkeit, persönliche Präferenzen, rationale Entscheidungsprozesse, soziale Netzwerkmechanismen, Reputation, Vertrauensbildung mit Kund*innen und Marktwettbewerb (Owen et al. 2014).

Ein besonders elementarer Aspekt bei der Modellierung von Installateur*innen ist die Aus- und Weiterbildung. Bildungssysteme und Ausbildungsprogramme sind von grundlegender Bedeutung für den Aufbau von Humankapital in dem Bereich sowie für die Verfeinerung von Fähigkeiten oder die Entwicklung neuer Kompetenzen, die zur Unterstützung der Energiewende erforderlich sind. Es ist allgemein anerkannt, dass Bildungseinrichtungen – in enger Verflechtung mit den Systemen für Forschung, Entwicklung und Produktion – eine zentrale Rolle spielen, um Prozesse der Wissensbildung und Innovation erfolgreich zu gestalten (Unger/Polt 2017). Trotz dieser strategischen Bedeutung gibt es nur wenige Versuche zu modellieren, wie Bildungseinrichtungen oder Ausbildungsprogramme die Bereitschaft der Arbeitskräfte und die Verfügbarkeit von Fähigkeiten beeinflussen. Stattdessen wird in den Modellen immer noch häufig implizit von einem stabilen oder exogenen Angebot an qualifizierten Arbeitskräften und Wissen ausgegangen, ohne zu erfassen, wie Bildungspolitik, Lehrpläne oder Lehrmethoden die bestehenden Installateur*innen und deren Einfluss auf die Innovationsdynamik beeinflussen könnten.

Für bessere Modellierungen ist es notwendig, die Position und Funktionalität von Installateur*innen in Energiesystemmodellen besser darzustellen und zu zeigen, wie sich diese Akteursgruppe – und die darin enthaltenen Fähigkeiten – im Laufe der Zeit entwickeln können. Eine solche Darstellung sollte Aspekte wie Verfügbarkeit, Verhaltensmuster, Strategie- und Entscheidungsprozesse sowie

die Funktionsweise und die Auswirkungen der zugrundeliegenden Aus- und Weiterbildungssysteme für Arbeitskräfte berücksichtigen. So könnte die Realitätsnähe der modellierten Szenarien und die Genauigkeit der Prognosen für die Technologieübernahme verbessert werden, was die Entwicklung wirksamerer politischer Maßnahmen unterstützt, und die allgemeine Entwicklung der Energietechnologiemärkte erleichtert.

3. Simulation der Dynamik von Installateur*innen – Das agentenbasierte Modell SLICK

Agentenbasierte Modelle (ABM) werden als potenziell wertvolle Ansätze betrachtet, um spezifische Dynamiken zu erfassen, die sich aus heterogen handelnden und interagierenden Akteur*innen ergeben, deren Handlungen auf unterschiedlichen Attributen und Entscheidungsregeln beruhen (Hansen et al. 2019). Auf diese Weise können Szenarien simuliert werden, in denen verschiedene Rahmenbedingungen und damit verbundene politische Optionen untersucht werden können. Obwohl ein zunehmendes Interesse an der Entwicklung agentenbasierter Methoden für die Politikgestaltung besteht, ist diese Entwicklung im Vergleich zu infrastrukturentwicklungs- und verbraucher*innenorientierten Modellen noch begrenzt (Yao et al. 2023).

Um die Auswirkungen soziotechnischer Aspekte und von Mechanismen des Wissensaustauschs auf die Innovationsdynamik – einschließlich der Rolle der Installateur*innen bei der Energiewende – besser simulieren und analysieren zu können, wurde das ABM SLICK entwickelt. SLICK (Simulating Learning Curves via Knowledge modelling) ist ein Modell, das die Analyse des Verhaltens von Akteur*innen in Innovationsnetzwerken ermöglicht. Es konzentriert sich auf die Auswirkungen unterschiedlicher Wissenstransfermechanismen zwischen verschiedenen Akteur*innen und die kontextspezifische Ausgestaltung solcher Mechanismen auf die Entwicklung technologischer Innovationssysteme. SLICK baut inhaltlich auf dem Modell SKIN (Simulating Knowledge Dynamics in Innovation Networks) (Gilbert et al. 2001) und auf SKIN-Energy auf (Droste-Franke et al. 2020).

Die Konzeptualisierung soziotechnischer Dynamiken ist von grundlegender Bedeutung für das Verständnis, wie technologische Innovationen entstehen, sich verbreiten und in die Gesellschaft eingebettet werden. Da sozio-technische Dynamiken an verschiedenen Orten und zwischen verschiedenen Akteur*innen innerhalb der Gesamtkomplexität von Energiesystemen stattfinden, kann eine

subsystembasierte Modularisierung die Transparenz und Flexibilität von Modellierungsrahmen verbessern. SLICK wurde in einer modularisierten Weise nach den Grundsätzen der Innovationssystemtheorie (IS) entwickelt (Lundvall 1992; Hekkert et al. 2007). Der Ansatz des Innovationssystems (IS) – ein Rahmen, der sich zu spezielleren Varianten entwickelt hat, einschließlich regionaler, nationaler und technologischer Innovationssysteme – konzeptualisiert Innovation als einen systemischen Prozess, an dem mehrere Akteur*innen, Institutionen und Netzwerke beteiligt sind, die gemeinsam die Entwicklung und Verbreitung von Technologien beeinflussen. Methodisch gesehen verwenden IS-Ansätze in der Regel qualitative und quantitative Analysen von Netzwerken, institutionellen Arrangements und Innovationsfunktionen sowie häufig Fallstudien, Netzwerkkartierungen und Funktionsanalysen, um Systemschwächen zu diagnostizieren und politische Interventionen zu entwerfen. Ein beispielhafter Überblick über die für SKIN-Energy und SLICK entwickelten Module ist in Abbildung 1 dargestellt.

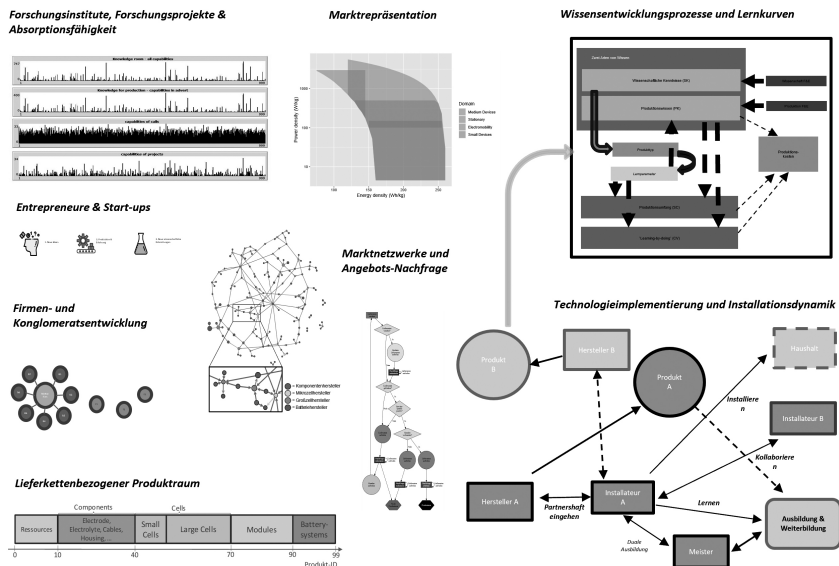


Abbildung 1: Überblick über die für SKIN-Energy und SLICK entwickelten Module. Dazu gehören (1) Forschungsinstitute, Forschungsprojekte & Absorptionsfähigkeit, (2) Marktrepräsentation differenziert nach Produkten, (3) Entrepreneure & Start-ups, (4) Firmen- & Konglomeratsentwicklung, (5) Marktnetzwerke & Angebots-Nachfrage-Dynamik, (6) Lieferkettenbezogener Produktraum, (7) Wissensentwicklungsprozesse und Lernkurven, und (8) Technologieimplementierung und Installationsdynamik (Quelle: eigene Darstellung)

SLICK zielt darauf ab, allgemeine Erkenntnisse und Wissen darüber zu gewinnen, welche politischen Maßnahmen zur Optimierung der Produktion und Installation bestimmter Technologien eingesetzt werden können. Dazu wurde in SLICK unter anderem ein Modul integriert, das den Einfluss der Installateur*innen abbildet (Abbildung 2)¹. Die Logik des Moduls basierte auf zwei Hauptdimensionen:

¹ Eine genauere Beschreibung des entwickelten Modells und der zugehörigen Module findet sich im Abschlussbericht des Projekts MANIFOLD. In diesem Bericht wird auch ein weiteres entwickeltes Modul detailliert beschrieben, das sich auf die Darstellung von

- **Die Anzahl der Installateur*innen:** Diese wird hauptsächlich durch das Bildungssystem bestimmt. Bei der Modellierung der Ausbildung wird das in Deutschland übliche „duale System“ – das heißt mit Ausbildung sowohl in der Berufsschule als auch in einem Meisterbetrieb mit Meister-Lehrling-Beziehung – abgebildet.
- **Das Verhalten der Installateur*innen:** Das Verhalten ist für jede*n Installateur*in spezifisch und wird durch mögliche Aktivitäten und individualisierte Strategiebildungsprozesse dargestellt:
 - o *Aktivitäten:* Dazu gehören (a) die Installation von Produkten, (b) das Lernen und die Erweiterung des Technologieportfolios durch zusätzliche Schulungsprogramme, (c) der Austausch von Informationen mit Produktherstellern und (d) der Austausch von Informationen und die Zusammenarbeit mit anderen Installateur*innen durch Vernetzung.
 - o *Strategie:* Die Strategie ist eng mit dem finanziellen Erfolg der Installateur*innen verbunden. Darüber hinaus wird das Verhalten der Installateur*innen auch durch persönliche Neigungen beeinflusst, die von konservativ bis progressiv reichen und die Richtung der Lernprozesse und die daraus resultierenden Produktportfolios beeinflussen.

Lernkurven und die Modellierung der damit verbundenen Kostensenkungsprozesse sowie die Simulation der Technologiepreisentwicklung konzentriert (Brugger et al. 2023). Darüber hinaus werden weitere Details zu Schlüsselvariablen innerhalb des Modells und Modellkopplungsverfahren mit anderen externen Modellen sowie zu den durchgeführten Kalibrierungs- und Validierungsansätzen gegeben. Es enthält auch einen detaillierten und vollständigen Überblick über die erzielten Ergebnisse der Szenario-Läufe sowie eine Diskussion aller aufgetretenen Einschränkungen und möglichen Forschungsrichtungen. Innerhalb des Modellpakets wird eine detaillierte Beschreibung der Hauptziele, der Funktionalität und der Betriebsverfahren bereitgestellt (Veröffentlichung in Planung).

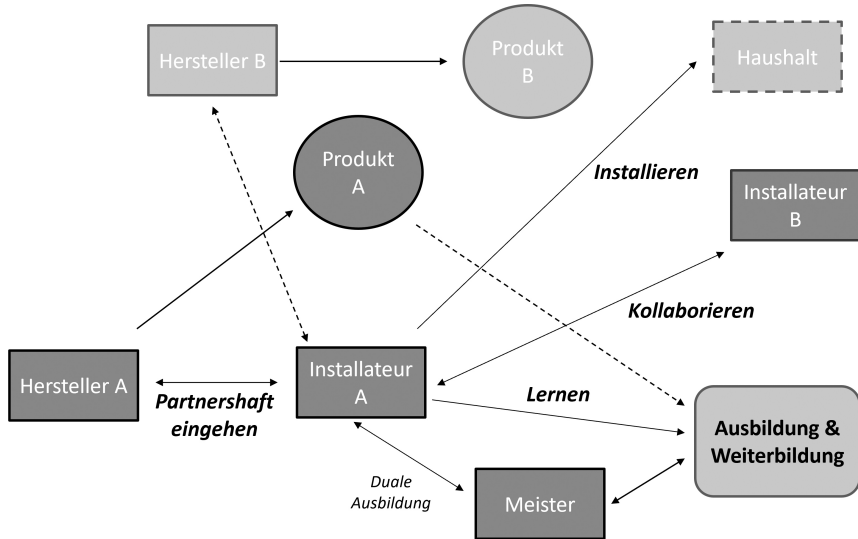


Abbildung 2: Schematische Darstellung des Installateur-Moduls (Quelle: eigene Darstellung)

Die untersuchten politischen Maßnahmen und die damit verbundenen Rahmenbedingungen haben zwei Dimensionen:

- (1) *Unterstützungssysteme*: Diese konzentrieren sich auf die Steuerung des Verhaltens und die Verbesserung der Fähigkeiten von (a) Zwischenhändler*innen, (b) Akteur*innen der Wertschöpfungskette und (c) Institutionen für die Aus- und Weiterbildung von Installateur*innen.
- (2) *Regulierung*: Diese Maßnahmen zielen insbesondere auf die Festlegung von Rahmenbedingungen ab, die das Verhalten der betroffenen Akteur*innen begrenzen und anreizen können.

Für die Parametrisierung von SLICK wurden empirische Untersuchungen – einschließlich Dokumentenanalysen, Interviews und Workshops – durchgeführt, um Prozesse und Akteur*innen zu identifizieren und zu charakterisieren sowie das Modell an beobachtete Innovationsnetzwerkstrukturen und mögliche zukünftige Marktanteile der Technologie zu kalibrieren. Die qualitativen Ergebnisse wurden durch quantitative Daten aus Statistiken über Unternehmen und Branchen, Patente sowie Forschungs- und Entwicklungsprogramme gestützt.

Um die Auswirkungen verschiedener politischer Maßnahmen auf die Struktur und die Entwicklung von Innovationsnetzwerken zu analysieren, wurden insgesamt vier Szenarien definiert, die sich auf die Produktion und Verbreitung von Heiztechnologien konzentrieren:

- *Referenzszenario*: Das Referenzszenario basiert auf den derzeit gültigen Instrumenten und dem bestehenden Status quo.
- *Szenario 1 – Liberal und technologieoffen*: In diesem Szenario werden alle modellierten Technologien gleichbehandelt. Im Vergleich zum Referenzszenario ist die Nachfrage nach gasbasierten Produkten hoch. Auch die Art der Ausbildung, die Installateur*innen erhalten, ist eher konservativ, da der Schwerpunkt auf gasbetriebenen Heizsystemen liegt.
- *Szenario 2 – Progressiv*: In diesem Szenario wird ein technologischer Wandel hin zu erneuerbaren Energien angestrebt. Relativ hohe finanzielle Investitionen werden getätigt, um die Kapazität und Zugänglichkeit der Aus- und Weiterbildungssysteme für Installateur*innen zu verbessern, wobei der Schwerpunkt auf der Förderung der erneuerbaren Energien und der Nischentechnologien Wärmepumpen und Brennstoffzellen liegt.
- *Szenario 3 – Moderat*: Im Vergleich zum Referenzszenario steigt die Nachfrage nach Wärmepumpen, ist aber im Vergleich zu Szenario 2 geringer. Die Aus- und Weiterbildung der Installateur*innen ist ausgewogen auf alle Heiztechnologien ausgerichtet, ohne dass eine Priorisierung erfolgt.

Da die Szenarien für den Zeitraum 2020–2050 entwickelt wurden, bestanden die einzelnen Szenariodurchläufe aus 372 Ticks, wobei 1 Tick für einen Monat steht. Jedes Szenario wurde anhand von 10 durchgeführten Simulationsläufen mit zufällig verteilten Eigenschaften der Agenten modelliert, aus denen die durchschnittlichen Wertentwicklungen berechnet und weiter analysiert wurden.

4. Politische Maßnahmen zur Förderung der Verbreitung von Heiztechnologien – eine Betrachtung

Die Betrachtung der Ergebnisse der simulierten Szenarien ergibt einige interessante Beobachtungen.

Erstens gab es bei der Zahl der installierten Heizeinheiten zwischen den Szenarien nur geringe Unterschiede in den Ergebnissen, trotz der erheblichen Unterschiede in der Strategie in Bezug auf die Schulung und die Ausbildung der Installateur*innen, einschließlich der Maßnahmen, die sich besonders auf die er-

neuerbaren Technologien konzentrieren (Abbildung 3). Das einzige Szenario, das heraussticht, ist *Szenario 1*, das hinsichtlich der Anzahl der installierten Produkte am schlechtesten abschneidet, insbesondere auf lange Sicht. Dies deutet darauf hin, dass ein gewisses Maß an unterschiedlichen Investitionen in die Förderung von Bildung und Ausbildung zu einer größeren Anzahl installierter Systeme führt (*Szenario 2*). Ein Vergleich mit *Szenario 3* zeigt jedoch, dass auch eine Kombination aus Marktförderung und geringerer Förderung von Aus- und Weiterbildung zu ähnlichen Zahlen führen kann, so dass das Kosten-Nutzen-Verhältnis in *Szenario 2* noch nicht optimal ist.

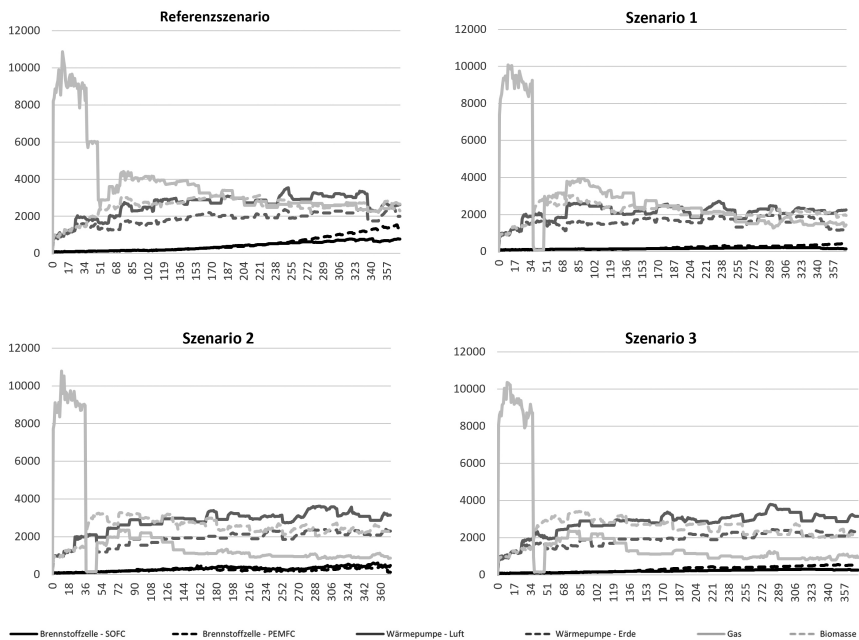


Abbildung 3: Installationen bestimmter Heiztechnikprodukte. X-Achse: Zeitschritte; Y-Achse: Anzahl der Installationen (Quelle: eigene Darstellung)

Zusätzlich zeigen die Ergebnisse einen starken Einfluss politischer Maßnahmen auf die Installationskapazität von Installateur*innen, hauptsächlich durch verbesserte Aus- und Weiterbildungsmöglichkeiten, mit Schwerpunkt auf der Wärmepumpentechnologie (Abbildung 4). Dieser politische Effekt ist in *Szenario 2*

besonders stark zu beobachten. In den anderen Szenarien ist die Kapazität der Installateur*innen im Verhältnis zu ihrem Technologieportfolio ähnlich.

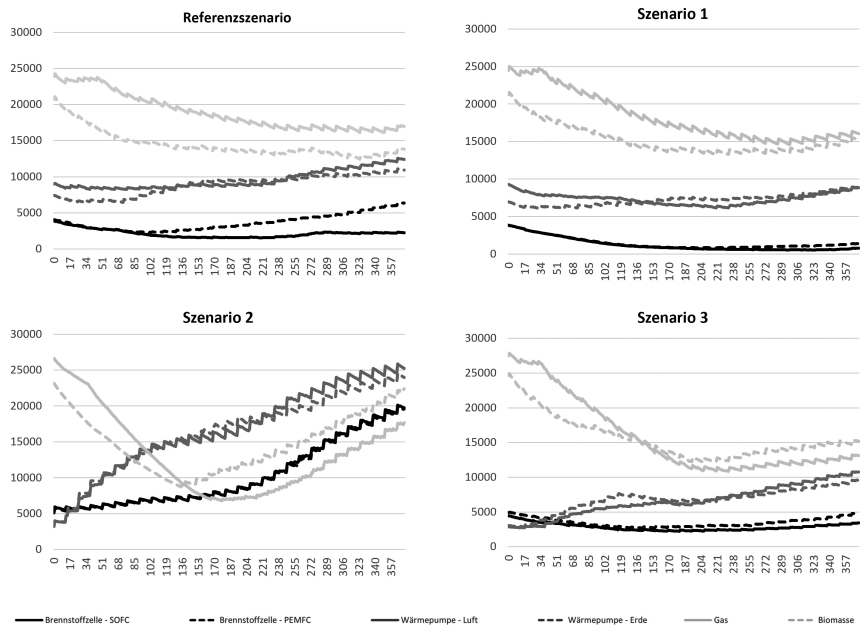


Abbildung 4: Aggregierte Gesamtinstallationskapazität der Installateur*innen für verschiedene Heiztechnologien, basierend auf der bei den einzelnen Installateur*innen verfügbaren Kapazität in den Produktportfolios. X-Achse: Zeitschritte; Y-Achse: Gesamtkapazität (installierbare Einheiten) (Quelle: eigene Darstellung)

Bezüglich der durchschnittlichen Größe des Unternehmensportfolios – das heißt die Anzahl der Herstellerfirmen, für die ein Installateur Endgeräte installieren könnte – besteht zwischen *Szenario 2* und den anderen Szenarien ein deutlicher Unterschied (Abbildung 5). Dieser Effekt ist auf die größere Aktivität in Lernprogrammen und damit auf die bessere Diversifizierung der Technologieportfolios der Installateur*innen zurückzuführen. Der tatsächliche Installationsbedarf der einzelnen Unternehmen ist jedoch nicht automatisch höher. Insbesondere für *Szenario 2*, bei dem die Gesamtpopulation der Installateur*innen im Modell am größten ist, führt der Wettbewerb zwischen relativ vielen Installateur*innen in

einem System mit einer ähnlichen Anzahl von Technologieherstellern zu einer geringeren Arbeitsbelastung der Installateur*innen pro Unternehmen.

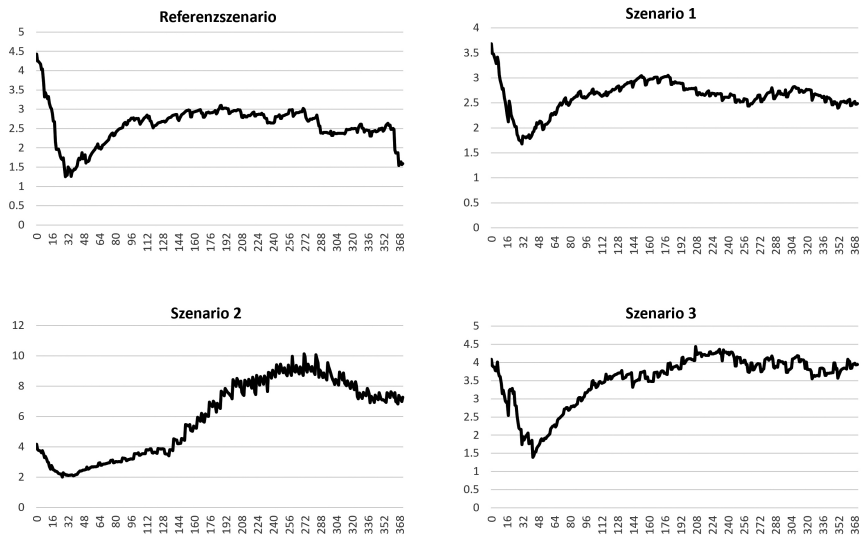


Abbildung 5: Größe des Unternehmensportfolios der Installateur*innen. X-Achse: Zeitschritte; Y-Achse: durchschnittliche Anzahl der Produzenten im Unternehmensportfolio (Quelle: eigene Darstellung)

Im Allgemeinen zeigen die Ergebnisse, dass hohe Investitionen in die Förderung klimafreundlicher Heiztechnologien nicht unbedingt linear zu besseren Bedingungen für die Diffusion dieser Technologien führen. Obwohl ein gewisses Maß an Investitionen in Systeme, in denen Technologien vorherrschen, die von der Öffentlichkeit nicht bevorzugt werden, vorteilhaft zu sein scheint, zeigen die Ergebnisse auch, dass dem Ausmaß der technologischen (Diffusions-)Gewinne, die durch eine starke Investitionspolitik erzielt werden können, Grenzen gesetzt sind. Es gibt sogar Anzeichen dafür, dass sich Überinvestitionen kontraproduktiv auswirken können, entweder durch indirekte Förderung bestehender marktherrschender Technologien (zum Beispiel gasbasierte Technologien) oder durch eine geringere Wettbewerbsfähigkeit anderer Nischentechnologien (zum Beispiel Brennstoffzellen).

Die in den Simulationen beobachtete potenzielle indirekte Unterstützung der dominanten Technologien ist besonders bemerkenswert. Trotz der auf die Förderung bestimmter Technologien ausgerichteten Politik – die bei *Szenario 2* besonders ausgeprägt war – begünstigen nach den Simulationen die verbesserten Systembedingungen, die sich häufig aus einer solchen Politik ergeben, auch andere Technologien, darunter auch die dominierende nicht erneuerbare, gasbasierte Technologie. Obwohl eine solche Unterstützung für dominante Technologien im Allgemeinen unbeabsichtigt ist, kann sie sich erheblich auf die Richtung der Innovationsdynamik auswirken. Aus den Modellierungen ergeben sich Anzeichen dafür, dass eine auf einzelnen Instrumenten basierende Politik zur Steuerung von Technologieverbreitungsmustern nicht kosteneffizient ist. Komplexe Zusammenhänge von Energiesystemen erfordern auch eine komplexe Politik, die mehrere Dimensionen der Märkte berücksichtigt und die vielschichtigen Wechselwirkungen zwischen verschiedenen Akteur*innen und Infrastrukturen in Betracht zieht.

Eine weitere interessante Beobachtung betrifft die Entwicklung der Zahl der Installateur*innen. Obwohl sich Investitionen in die Aus- und Weiterbildung von Installateur*innen direkt auf die Verfügbarkeit und das Wachstum von Installationskapazitäten für bestimmte Heiztechnologien auswirken, überbrücken sie nicht unmittelbar die Diskrepanz zwischen der bestehenden Technologienachfrage und der begrenzten Installationskapazität. Dies ist vor allem auf die Zeitintensität von Lern- und Ausbildungsprogrammen sowie auf den allgemein langen Lebenszyklus von Heiztechnologien zurückzuführen. In Situationen, in denen die Nachfrage nach einem bestimmten Produkt nicht befriedigt werden kann und stattdessen eine alternative Lösung verwendet wird, kann sich die Dynamik der Nachfrage nach bestimmten Produkten verlangsamen.

5. Schlussfolgerung

Die Modellierung sozio-technischer Dynamiken in Energiesystemen hat sich bereits über den rein technisch-ökonomischen Rahmen hinaus weiterentwickelt, doch wichtige Intermediäre wie Installateur*innen und Bildungssysteme waren lange Zeit nicht ausreichend abgebildet. Während die Konzepte zu Innovationsystemen diese Akteur*innen im Blick haben, sind sie bisher in Modellen kaum berücksichtigt worden. Die diskutierten beispielhaften Ergebnisse des agentenbasierten Modells SLICK, das die Dynamik von Installateur*innen erfasst, ermöglichen einige Rückschlüsse auf Nutzen und Grenzen solcher Modellierungen.

Insgesamt zeigen die Simulationen, dass die Komplexität sozio-technischer Systeme die Bewertung wirksamer Rahmenbedingungen erheblich beeinflussen kann.

Allerdings ist bei der Integration der gewonnenen Erkenntnisse in die Politikberatung noch Vorsicht geboten. Eine große Herausforderung bei der Modellierung soziotechnischer Dynamiken ist nach wie vor der Mangel an umfassenden Daten über Akteur*innen wie Installateur*innen und Bildungssysteme. Umfragen und ethnografische Studien liefern zwar qualitative Erkenntnisse, aber quantitative Daten zu wichtigen Akteursgruppen und Systemstrukturen – zum Beispiel in Bezug auf Installateursnetzwerke, die Qualität und Wirkung von Aus- und Weiterbildungsmaßnahmen oder strategische Entscheidungsprozesse innerhalb von Firmen-Installateur-Konstellationen – sind rar (Merthi 2023). Hier könnte sich der Aufbau interdisziplinärer Kooperationsstrukturen unter Einbeziehung verschiedener Gemeinschaften – darunter Energiemodellierer*innen, Sozialwissenschaftler*innen, Pädagog*innen und Interessenvertreter*innen der Industrie – als entscheidend erweisen, um reichhaltigere Datensätze zu entwickeln, komplexe Rollen und Verhaltensweisen verschiedener Akteur*innen besser zu erfassen, und die Modellkalibrierung insgesamt zu verbessern. Solche Entwicklungen zusammen mit entsprechenden Modellierungen können die praktische politische Relevanz von Energiesystemmodellen und ihre Unterstützung für die Energiewende signifikant erhöhen.

Danksagung

Die in diesem Papier vorgestellten Forschungsarbeiten wurden im Rahmen des Projekts MANIFOLD (Modellentwicklung und Modellkopplung zu Akteursverhalten in Innovations- und Diffusions-Netzwerken) – mit einer Laufzeit vom 1. Oktober 2019 bis 31. Oktober 2023 – durchgeführt. MANIFOLD wurde im Rahmen des Siebten Energieforschungsprogramms durch das Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK) finanziert.

Referenzen

- Bolwig, S.; Bazbauers, G.; Klitkou, A.; Lund, P. D.; Blumberga, A.; Gravelinsins, A.; Blumberga, D. (2019): Review of modelling energy transitions pathways with application to energy system flexibility. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 101, S. 440–452

- Brugger, H.; Pröpper, A.; Bernath, C.; Droste-Franke, B.; Voge, M.; van Doren, D.; Dobbins, A.; Fahl, U.; Haller, K.; Wassermann, S.; Steinbach, J.; Senkpiel, C.; Thelen, C.; Nolte, H.; Kost, C.; Kockel, C.; Kulawik, J.; Wille, F. (2023): Endbericht Projekt MANIFOLD – Modellentwicklung und Modellkopplung zu Akteursverhalten in Innovations- und Diffusionsnetzwerken. Karlsruhe
- Crespo del Granado, P.; van Nieuwkoop, R. H.; Kardakos, E. G.; Schaffner, C. (2018): Modelling the energy transition: A nexus of energy system and economic models. In: *Energy Strategy Reviews* 20, S. 229–235
- Dimitrov, R. S. (2016): The Paris Agreement on Climate Change: Behind Closed Doors. In: *Global Environmental Politics* 16(3), S. 1–11
- Droste-Franke, B.; Fohr, G.; Voge, M.; Nietgen, T.; van Doren, D.; Sullivan, M. O.; Deissenroth, M.; Nitsch, F.; Weidle, M.; O'Sullivan, M.; Deissenroth, M.; Nitsch, F.; Jacqué, K. (2020): Endbericht Projekt Innosen – Simulation von Innovationsdynamiken neuer Schlüsseltechnologien im Energiebereich am Beispiel von Lithium-Batterien. Bad Neuenahr-Ahrweiler
- Droste-Franke, B.; Fohr, G.; van Doren, D.; Voge, M.; Bergfeld, M.; Brand-Daniels, U.; Derendorf, K.; Dziakowski, M.; Gils, H. C.; Harb, G.; Pragada, G.; Mocanu, T.; Nägele, S.; Netz, H.; Plener, M.; Schulz, A.; Wigger, H.; Yeligi, M.; Prehofer, S. (2025): Endbericht Projekt ReMoDigital – Resilience Monitoring for the Digitalisation of the Energy Transition. Bad Neuenahr-Ahrweiler
- Gilbert, N., Pyka, A. and Ahrweiler, P. (2001): Innovation Networks – A Simulation Approach. In: *Journal of Artificial Societies and Social Simulation*, 4(3), S. 1–14
- Hansen, P., Liu, X. and Morrison, G. M. (2019): Agent-based modelling and socio-technical energy transitions: A systematic literature review. In: *Energy Research & Social Science* 49, S. 41–52
- Hekkert, M.; Suurs, R.; Negro, S.; Kuhlmann, S.; Smits, R. (2007): Functions of innovation systems: A new approach for analysing technological change. In: *Technological Forecasting and Social Change* 74(4), S. 413–432
- International Energy Agency IEA (2025): Global Energy Review 2025. International Energy Agency
- Khan, K.; Su, C. W.; Rehman, A. U.; Ullah, R. (2022): Is technological innovation a driver of renewable energy? In: *Technology in Society* 70, S. 102044
- Krumm, A.; Süsser, D.; Blechinger, P. (2022): Modelling social aspects of the energy transition: What is the current representation of social factors in energy models? In: *Energy* 239, S. 121706
- Liegl, T.; Schramm, S.; Kuhn, P.; Hamacher, T. (2023): Considering Socio-Technical Parameters in Energy System Models – The Current Status and Next Steps. In: *Energies* 16(20), S. 7020
- Lundvall, B.-Å. (1992): National Systems of Innovation: Towards a Theory of Innovation and Interactive learning. In: Lundvall, B.-Å. (Hg.) (1992): *The Learning Economy and the Economics of Hope*. Anthem Press, London
- Markard, J.; Hoffmann, V. H. (2016): Analysis of complementarities: Framework and examples from the energy transition. In: *Technological Forecasting and Social Change* 111, S. 63–75
- Merthi, V. (2023): Examining Socio-Technical Factors in Energy System Models: Present Situation and Future Directions. In: *Arts and Social Sciences Journal* 14(5), S. 579

- Moomaw, W.; Yamba, F.; Kamimoto, M.; Maurice, L.; Nyboer, J.; Urama, K.; Weir, T. (2011): Introduction. In: Edenhofer, O. et al. (Hg.) (2011): IPCC Special Report on Renewable Energy Sources and Climate Change Mitigation. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, S. 161–208
- Owen, A.; Mitchell, G.; Gouldson, A. (2014): Unseen influence – The role of low carbon retrofit advisers and installers in the adoption and use of domestic energy technology. In: Energy Policy 73, S. 169–179
- Unger, M.; Polt, W. (2017): The knowledge triangle between research, education and innovation – A conceptual discussion. Foresight and STI Governance 11(2), S. 10–26
- Yao, R., Hu, Y. and Varga, L. (2023): Applications of Agent-Based Methods in Multi-Energy Systems – A Systematic Literature Review. In: Energies 16, S. 2456