

Parametrisierung sektorübergreifender agentenbasierter Energiesystemmodelle

Methodik zur Erzeugung von Wirkungsgradkennlinien

M. Maier, J. Bortloff, J. Navarro Oster

ZUSAMMENFASSUNG Der Beitrag stellt eine technologieübergreifende, vergleichbare Modellierungsmethodik als End-to-End-Prozess zur effizienten Erzeugung von Wirkungsgradkennlinien aus heterogenen Ausgangsdaten für agentenbasierte Energiesystemmodelle vor. Durch die vorgeschlagene mathematische Abbildung der Wirkungsgradkennlinien als Funktionen wird eine recheneffiziente Simulation sektorübergreifender Energiesystemmodellierungen mit einer Vielzahl verschiedenartiger Agenten ermöglicht.

STICHWÖRTER

Simulation, Nachhaltigkeit, Energieeffizienz

Methodology for generating efficiency curves – Parameterization of cross-sector agent-based energy system models

ABSTRACT The article presents a cross-technology, comparable modeling methodology as an end-to-end process for the efficient generation of efficiency curves from heterogeneous input data for agent-based energy system models. The proposed mathematical representation of the efficiency curves as functions enables computationally efficient simulation of cross-sector energy system models with a large number of different agents.

1 Problemstellung im Kontext der Energiesystemmodellierung

Die Modellierung von Energiesystemen erfährt im Zuge der zunehmenden Kopplung verschiedener Sektoren eine erhebliche Zunahme an Komplexität. Damit geht die Notwendigkeit einher, Abhängigkeiten sowohl innerhalb einzelner Sektoren als auch zwischen ihnen adäquat abzubilden. Für die Modellierung dieser Beziehungen in sektorübergreifenden Energiesystemen bietet sich die agentenbasierte Modellierung an. Sie erlaubt es, unterschiedliche Akteure und technische Komponenten mit individuellen Zielen, Restriktionen und Entscheidungsregeln zu modellieren. Jeder Sektor kann dabei durch eigene Agententypen und Infrastrukturen beschrieben werden, die über agentenbasierte Interaktionen miteinander gekoppelt sind. Darauf aufbauend kann die Optimierung von Zielfunktionen integriert werden. Auf diese Weise lassen sich Interdependenzen zwischen den Sektoren detaillierter modellieren [1].

Der Fokus der vorgestellten Modellierungsmethodik liegt auf sektorgekoppelten Stromwärmesystemen. Die Modellierungsmethodik umfasst ein technologieübergreifendes Vorgehen zur effizienten Erstellung von validierten Wirkungsgradkennlinien und deren Integration in agentenbasierte Energiesystemmodellen. Ein besonderer Schwerpunkt liegt auf der Abbildung lastabhängiger Wirkungsgrade, da diese für eine realitätsnahe Beschreibung des Betriebsverhaltens von Anlagen in gekoppelten Energiesystemen von zentraler Bedeutung sind [2].

2 Theoretische Grundlagen und Stand der Technik

2.1 Agentenbasierte Energiesystemmodelle

Agentenbasierte Modelle haben sich in der Energiesystemmodellierung vor allem dort etabliert, wo heterogene Akteure, komplexe Marktmechanismen und sektorübergreifende Interaktionen zusammenwirken und abgebildet werden sollen. Ein Agent repräsentiert dabei eine abgegrenzte Systemeinheit innerhalb des Gesamtmodells mit dezidierten Eigenschaften sowie Entscheidungs- und Verhaltensregeln. Diese Eigenschaften und Regeln werden als Funktionen ihrer Umgebung und deren wechselseitiger Interaktionen formuliert. So ist es möglich, Entscheidungslogiken direkt in das Modell zu integrieren. Im Mittelpunkt steht damit ein Bottom-up-Ansatz. Liegen ausreichend Informationen über Entscheidungsprozesse und Interaktionsverhalten vor, kann ein Gesamtsystem aus dem Zusammenspiel einzelner Agenten simuliert werden.

Gleichzeitig zeichnen sich agentenbasierte Modelle durch ein hohes Maß an Flexibilität aus. Sie sind in der Lage, Verhaltensweisen und Merkmale komplexer Systeme wie beispielsweise externe Störungen abzubilden. Die agentenbasierte Modellierung hat sich zur Modellierung und Analyse des Strommarktes als hilfreich erwiesen. Zum Beispiel wird das vom DLR entwickelte Modell „Amiris“ genutzt, um das elektrische System unter Mitbetrachtung des regulatorischen Rahmens, der Systemakteure und der Märkte zu modellieren. Weitere Modelle sind beispielsweise „EMLab-Generation“ oder „PowerACE“ [1].

In der von Yao, Hu und Varga [3] erstellten Übersicht wird die aktuelle und künftige Relevanz der agentenbasierten Modellie-

rung in sektorübergreifenden Energiesystemen verdeutlicht. Die Anzahl der Publikationen in diesem Themenfeld hat sich vom Jahr 2019 auf das Jahr 2020 verdoppelt. Diese Zahl verteilt sich zu nahezu gleichen Anteilen auf die Modellierung von Gebäuden, Quartieren und Regionen. Vereinzelt wird die agentenbasierte Simulation auch in sozio-technischen Bereichen wie beispielsweise bei politischen Entscheidungen und im Verbraucherverhalten eingesetzt [3].

Mit Blick auf die sektorübergreifende Modellierung von Energiesystemen ist eine weitere Standardisierung notwendig. Das verdeutlichen vor allem die Auswertungen aus [1]. Darin werden die Vorteile und auch die Grenzen der agentenbasierten Modellierung und Simulation von Energiesystemen mithilfe von Use Cases analysiert. Als ein typisches Problem wurde das Spannungsfeld zwischen der korrekten physikalischen Abbildung der Agenten und der Reduktion der Komplexität identifiziert. Aus den Analysen geht außerdem hervor, dass die Energiesystemmodellierung meist technologiespezifisch und die Parametrisierung nicht standardisiert ist und somit Expertenwissen erfordert.

Es gibt Ansätze, die Reproduzierbarkeit durch vollständiger Modellbeschreibungen, beispielsweise durch das ODD (Overview, Design concepts, Details)-Protokoll, zu vereinfachen [1]. Das ODD-Protokoll ist ein Schema zur Beschreibung agentenbasierter (und weiterer) Modelle und strukturiert deren Beschreibung in die drei Hauptabschnitte „Overview“, „Design concepts“ und „Details“. Im „Overview“-Abschnitt werden unter anderem Zweck, Entitäten sowie der Prozessablauf beschrieben. Der Abschnitt „Design concepts“ beschreibt die konzeptionellen Prinzipien/Mechanismen. Im Abschnitt „Details“ können unter anderem Initialisierung, Eingabedaten und Submodelle (wie Regeln/Algorithmen) beschrieben werden. Die Nutzung des Schemas unterstützt bei einer vollständigen, reproduzierbaren Modellierung und Modellbeschreibung [4].

Neben rein agentenbasierten Modellen können weitere Modellierungsansätze für die sektorübergreifende Energiesystemmodellierung von Multi-Energie-Systemen (MES) genutzt werden. Ein Ansatz ist die Modellierung mittels Energy Hub. Dabei werden unterschiedliche Energieträger als Ein- und Ausgangsgrößen eines Knotenpunktes modelliert. Die Kopplung der Energieflüsse erfolgt über eine Kopplungs- oder Konversionsmatrix, deren Elemente die Umwandlungsbeziehungen zwischen den einzelnen Energieträgern abbilden. Die Darstellung erlaubt eine eindeutige Beschreibung von Energieumwandlungen in MES [5]. Jenseits von Energy-Hub-Modellen werden für die Transformationspfadanalyse auch gezielt sektorenübergreifende Modelle eingesetzt. Ein Beispiel ist das vom Fraunhofer ISE entwickelte Modell „RE-Mod“ (Regenerative Energy Model), das kostenoptimale Transformationspfade unter CO₂-Budgets beziehungsweise Emissionsminderungszielen berechnet und mehrere Sektoren integriert [6].

Im Bereich der Parametrisierung der Modelle hat sich gezeigt, dass bislang eine standardisierte Erzeugung von Wirkungsgradkennlinien einzelner Agenten als Funktionsdarstellungen fehlt, die sich direkt in agentenbasierten Modellen verwenden lassen. Die hier vorgestellte Methodik stellt eine solche Methodik vor.

2.2 Mathematische Vereinfachungsansätze zur Kennlinienmodellierung

Kennlinienmodelle von Energiesystemen zur Abbildung des Wirkungsgrades unter Teillast, etwa für Wärmepumpen, Kälte-

anlagen oder Elektrolyseure, lassen sich nach ihrer Komplexität und ihrem Detaillierungsgrad in drei Kategorien einteilen: empirische, semi-empirische und analytische Modelle.

Empirische Modelle, auch als funktionsangepasste Modelle bezeichnet, berechnen anhand gemessener Realdaten, Labortests oder Daten von Referenzmaschinen parametrische Gleichungen. Zum Beispiel wird bei Wärmepumpen sowie Kälteanlagen durch die Standardisierung von experimentellen Testdaten nach Norm DIN EN 14511 die Nutzung von Gleichungen für Simulationen unterschiedlicher Wärmepumpentypen ermöglicht [7]. In der Literatur werden Wärmepumpen als Black-Box modelliert, bei der Quell- und Vorlauftemperatur ausreichen, um COP (coefficient of performance) und Wärmeleistung mittels einer polynomialen Regressionsfunktion zu bestimmen [8]. Modelle mit Parameterschätzung, auch semi-empirische Modelle oder Grey-Box-Modelle genannt, finden einen Kompromiss zwischen Genauigkeit und Rechenaufwand. Parameter werden anhand von Messdaten ermittelt und somit die physikalischen Beziehungen besser als bei funktionsangepassten Modellen abgebildet [7]. Dabei werden beispielsweise Parameterschätzungen zur Modellierung von Wärmepumpen durchgeführt und dann mit den Ergebnissen einer angepassten Funktion verglichen.

Aus der betrachteten Literatur geht hervor, dass bei allen Fehleranalysen und in allen verglichenen Betriebspunkten eine Parameterschätzung genauere Ergebnisse liefert [9]. Analytische Modelle, auch als White-Box-Modelle bezeichnet, basieren auf einer physikalischen Modellbeschreibung [10]. In physikalischen Modellen einer Brennstoffzelle vom Typ „Pemfc“ (Proton Exchange Membrane Fuel Cell) beispielsweise werden umfangreiche Gleichungssysteme verwendet, um die physikalisch-chemischen Phänomene der Funktionsweise zu beschreiben [11]. Zum Beispiel können Ein- und Ausschaltvorgänge die Stack-Temperatur und die Konzentration der Reaktionsgase an der Elektrodenoberfläche beeinflussen. Diese Zusammenhänge werden in analytischen Modellen mittels Gleichungssystemen abgebildet [11].

Auf Basis von Merkmalsbeschreibungen einer Technologie (wie etwa Herstellerdatenblätter) stellen empirische Modelle den zweckmäßigsten und effizientesten Ansatz für technologieübergreifende, agentenbasierte Energiesystemanalysen dar, da sie eine konsistente und recheneffiziente Abbildung des Wirkungsgradverhaltens unterschiedlicher Technologien ermöglichen. Bisweilen sind jedoch keine Verfahren beschrieben, etabliert und standardisiert, die eine weitgehend automatisierte Erstellung, Auswahl und Parametrisierung geeigneter Wirkungsgradkennlinien erlauben. Das gilt insbesondere für komplexe Energiesysteme mit einer Vielzahl an unterschiedlichen Technologien, etwa Power-to-X-Anlagen, Wärmepumpen, Blockheizkraftwerke (BHKW) oder Elektrolyseure. Diese Forschungslücke ist vor allem angesichts der Dekarbonisierung von Energiesystemen von hoher Relevanz. Es wird angenommen, dass in künftigen Energiesystemen durch die Kopplung mehrerer Sektoren (Strom, Wärme, Kälte) mit unterschiedlichen Technologien eine Methodik benötigt wird, um den Prozess der Wirkungsgradkennlinienerstellung effizient und standardisiert abbilden zu können. Diese identifizierten Defizite bilden den methodischen Ausgangspunkt für die hier vorgestellte Modellierungsmethodik.

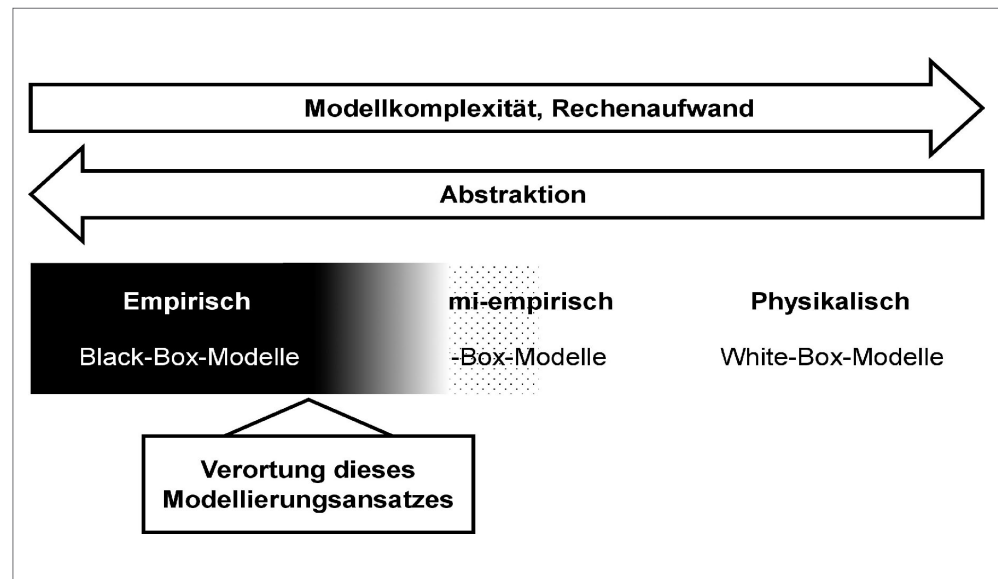


Bild 1 Verortung der Modellierungsmethodik zwischen empirischen und physikalischen Modellansätzen. Grafik: IFF Uni Stuttgart, Campus Schwarzwald

3 Modellierungsmethodik

3.1 Konzeptionelle Grundlagen

Das Grundkonzept der Modellierungsmethodik zur Abbildung von Wirkungsgradkennlinien für die agentenbasierte Modellierung ist als strukturierter Transformationsprozess ausgelegt, der die heterogenen wirkungsgradbezogenen Eingangsdaten in eine simulationsfähige Wirkungsgradkennlinie überführt.

Wie in **Bild 1** dargestellt, ist die vorgestellte Methodik primär auf einer empirischen bis semi-empirischen Modellierungsebene verortet (abhängig von der angestrebten Modellgüte), da die Wirkungsgradkennlinien aus Mess-, Hersteller- und/oder Referenzdaten abgeleitet und in mathematische Funktionsdarstellungen überführt werden. Die Methodik positioniert sich damit zwischen reinen Black-Box-Modellen und physikalischen Modellierungen und stellt einen pragmatischen, praxistauglichen Ansatz zur Kennlinienmodellierung für große Simulationsmodelle mit einer Vielzahl von Agenten dar.

Ziel ist die effiziente und konsistente Abbildung von Wirkungsgradzusammenhängen im Betrieb von Energiesystemkomponenten, in eine formalisierte mathematische Form, die direkt in agentenbasierten Energiesystemmodellen integriert und genutzt werden kann. Im Grundkonzept ist die Methodik technologieübergreifend konzipiert. Sie zielt damit nicht auf die detaillierte Abbildung einzelner Technologien, sondern auf die formale Beschreibung des einheitlichen Vorgehens zur Kennlinienerzeugung ab. Dies ermöglicht eine reproduzierbare und vergleichbare Parametrisierung unterschiedlicher Technologien für agentenbasierte Simulationsmodelle.

Die Grundlogik der Methodik folgt der Modelltheorie nach *Stachowiak* [12] und erfüllt das Abbildungs-, Verkürzungs- und das pragmatische Merkmal. Die Methodik reduziert die zu modellierende Technologie auf die Merkmale, die für die Simulation des Agentenverhaltens relevant sind. Die wirkungsgradbezogenen Eigenschaften der modellierten Anlage werden auf einen einzigen mathematischen Funktionsraum abgebildet (eine einzige Funktion). Es handelt sich folglich um eine abstrahierende und auf den simulationspraktischen Einsatz ausgerichtete Form der Wirkungsgradkennlinienmodellierung. Betrachtet werden bei der Methodik nur die wirkungsgradbezogenen Merkmale und Umwelteinfluss-

größen, die einen direkten Bezug zu den Umwandlungsbeziehungen zwischen Energieformen aufweisen und statischer Natur sind. Das bedeutet, die Methodik beschränkt sich auf die Erzeugung statischer Wirkungsgradkennlinien. Nicht Bestandteil der Kennlinien sind realphysikalische Detaillierungen, hardwarenahe Regelstrategien sowie jede Form von Dynamiken wie Rampen, Taktbetrieb oder stochastische Effekte (unter anderem Ausfälle). Diese Aspekte können auf höheren Modellebenen ergänzt werden, bleiben jedoch außerhalb der Kennlinienmodellierung.

3.2 Eigenschaften der Modellierungsmethodik

Die Modellierungsmethodik und die damit erzeugten Wirkungsgradkennlinien weisen folgende zentrale Eigenschaften auf:

1. **Modularität:** Kernmerkmal der Methodik ist die Trennung zwischen generischem Modellierungsansatz und technologie-spezifischer Parametrisierung. Die Methodik bleibt unverändert, während Wirkungsgradkennlinien als austauschbare Instanzen erzeugt werden. Neue Technologien, respektive Agenten, können modelliert werden, ohne die Methodik anzupassen.
2. **Technologieneutralität:** Die Methodik ist technologieneutral ausgelegt und orientiert sich an grundlegenden Funktionsprinzipien energetischer Wandler. Unterschiedliche Technologien lassen sich dadurch nach dem gleichen Modellierungsansatz beschreiben.
3. **Mehrdimensionalität bei begrenzter Komplexität:** Zur Abbildung der Wirkungsgradabhängigkeiten werden Lastzustände, Betriebsmodi und nur die relevantesten wirkungsgradbeeinflussenden Umweltparameter berücksichtigt. Die Anzahl der Einflussgrößen ist begrenzt, um den Berechnungsaufwand bei der Simulation bei einer großen Anzahl von Agenten zu minimieren. Die Modellierungsmethodik dient damit folglich der Abbildung mehrdimensionaler Wirkungsgradzusammenhänge.
4. **Mathematische Abbildung der Wirkungsgradkennlinien:** Die Modellierungsmethodik ist so gestaltet, dass unterschiedliche Funktionsansätze gewählt werden können. Die Wahl der mathematischen Darstellung erfolgt in Abhängigkeit der benötigten Abbildungsgenauigkeit, abgeleitet aus den Modellgüteanforderungen und der verfügbaren Datenbasis. Die mathematische

Beschreibung der Wirkungsgradkennlinien erfolgt über lineare Funktionen oder Polynome maximal zweiten Grades.

5. Formalisiert und validierbar: Die erzeugten Wirkungsgradkennlinien liegen als mathematische Funktionen vor und können direkt in die agentenbasierten Modelle integriert werden. Die Validierung erfolgt durch den Abgleich mit unter anderem Referenz- und Herstellerdaten. Der Umfang der Validierung richtet sich nach der geforderten gesicherten Modellgüte.

3.3 Mathematischer Ansatz zur Wirkungsgradkennlinienmodellierung

Gemäß der Modelltheorie von *Stachowiak* [12] sollen Modelle die Realität verkürzen, strukturieren und pragmatisch nutzbar sein, wobei sich dies in diesem Modellierungskonzept in der Abbildung der Wirkungsgradkennlinien als Funktionen konkretisiert. Im Folgenden werden die vorgeschlagenen Lösungsansätze der Kennlinienabbildung zusammengefasst mit auf Modellgüte, Recheneffizienz und Integrationsfähigkeit in agentenbasierte Modelle. Die Auswahl des Beschreibungsansatzes erfolgt datenbasiert anhand des Kennlinienverlaufs und der geforderten Modellgüte. Der Gültigkeitsbereich der erzeugten Kennlinien ist von der zugrunde liegenden Datenbasis abhängig und muss dokumentiert werden. Für die Kennlinienmodellierung kommen lineare Funktionen oder Polynome maximal 2. Grades zum Einsatz, da sie sich zumeist direkt in Agenten integrieren lassen. Außerdem gewährleisten diese Funktionen eine eindeutige formale Beschreibung und stetige Funktionsverläufe.

Diese Eigenschaften sind Basisanforderungen für die Nutzung in der Simulation, da darauf aufbauend Optimierungsansätze vereinfacht implementiert werden können. Daneben ermöglicht die formelbasierte Abbildung der Wirkungsgradkennlinien eine gute Implementierbarkeit in agentenbasierte Modellierungen und eine effiziente Simulation auch in umfangreichen Multi-Agenten-Simulationen. Höhere Polynomgrade sollten vermieden werden, da sich im Prozess der Methodenerstellung gezeigt hat, dass dem zusätzlichen Aufwand in der Modellierung kein signifikanter Zugewinn an Modellgüte gegenübersteht. Der Ansatz ist somit ein Kompromiss zwischen Abstraktion, Abbildungsgenauigkeit und Recheneffizienz. Gleichzeitig kann die Modellkomplexität bei Bedarf erweitert werden. Aus simulationspraktischer Sicht sprechen vor allem die effiziente Auswertbarkeit, der geringe Speicherbedarf sowie der Verzicht auf Nebenoperationen wie Lookup-Tabellen oder iterative Lösungsverfahren für den gewählten Ansatz.

3.4 End-to-End-Prozess der Modellierungsmethodik

Die Anwendung der Modellierungsmethodik folgt einem strukturierten Prozess, der in **Bild 2** abgebildet ist. Der Prozess umfasst die Definition eines konkreten Anwendungsfalls bis hin zur validierten, simulationsfähigen Wirkungsgradkennlinie. Nachfolgend wird der End-to-End-Prozess der Wirkungsgradkennlinienerstellung beschrieben. Ziel ist es, heterogene wirkungsgradbezogene Informationen in die formal beschriebene Kennlinienfunktion zu überführen. Die Ausgestaltung einzelner Schritte kann je nach Anwendungsfall variieren, die methodische Grundlogik bleibt jedoch identisch.

Im ersten Schritt wird der Anwendungsfall definiert. Hierzu zählt die Festlegung des Simulationsziels und der Modellgüteanforderungen. Der Anwendungsfall bestimmt den Kontext der

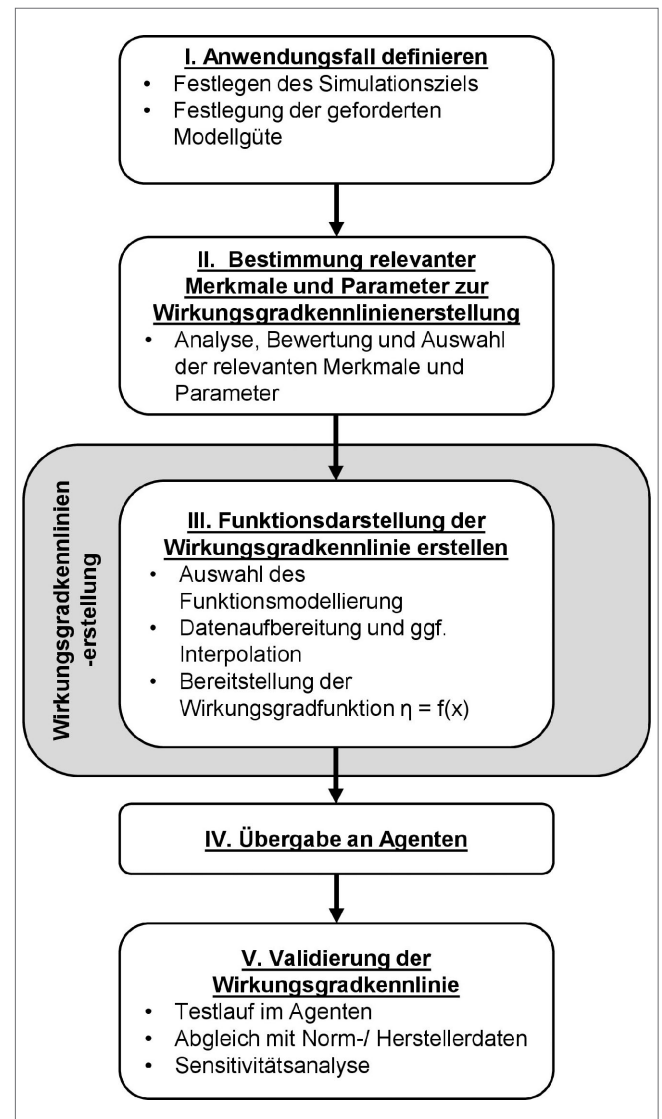


Bild 2 Prozessablauf der Modellierungsmethodik. Grafik: IFF Uni Stuttgart, Campus Schwarzwald

Kennlinienmodellierung und legt fest, welche Fragestellungen mit dem Energiesystemmodell untersucht werden sollen. Aus der Definition des Anwendungsfalls wird der Detaillierungsgrad der Kennlinienmodellierung abgeleitet.

Basierend auf dem Anwendungsfall und den Merkmalsbeschreibungen zur Technologie werden im zweiten Schritt die Merkmale identifiziert, die den Wirkungsgradverlauf maßgeblich beeinflussen. Dies sind typischerweise Leistungsbereiche, Betriebsmodi und die wirkungsgradbeeinflussenden Umweltgrößen. Diese Parameter sind zwingend in die Kennlinienmodellierung aufzunehmen. Gleichzeitig muss die Anzahl der Einflussgrößen begrenzt werden, um die Modellkomplexität und den Rechenaufwand im Gesamtsystem gering zu halten. Dieser Prozessschritt erfordert eine fundierte Kenntnis über die Funktionsweise der betrachteten Technologie.

Der dritte Schritt bildet den methodischen Kern der Anwendung der Methodik. Die ausgewählten Parameter werden nun in die Funktion überführt, die den charakteristischen Verlauf der Wirkungsgradkennlinie gemäß der Modellgüteanforderungen abbilden kann. Die Merkmale, die in die Modellierung einfließen,

werden auf Konsistenz geprüft und gegebenenfalls normiert und harmonisiert, um eine Vergleichbarkeit und Reproduzierbarkeit der erzeugten Kennlinien zu gewährleisten. Die Datenaufbereitung ist integraler Bestandteil des Kennlinienmodellierungsprozesses. Teils ist eine Interpolation der Daten erforderlich. Abhängig vom Verlauf der Wirkungsgradkennlinie und der gewählten Modellgüte erfolgt die Auswahl zwischen einem linearen Funktionsansatz oder einer Polynomfunktion. Das Ergebnis ist die abstrahierte, mathematisch konsistente und im Gültigkeitsbereich stetige Wirkungsgradfunktion. Diese liegt in der simulationsfähigen Form „ $\eta = f(x)$ “ vor und enthält alle relevanten Abhängigkeiten. Die erzeugte Wirkungsgradkennlinie wird nun im Agenten des Simulationsmodells hinterlegt. Dieser Schritt umfasst ausschließlich die Integration der Kennlinie in den Agenten. Die Kennlinie wird dabei als agenteninterne Funktion eingebettet und steht nur dem Agenten für Berechnungen zur Verfügung. Die Übergabe erfolgt im Normalfall ohne Modifikation der Kennlinie.

Der letzte Schritt ist die Validierung der erzeugten Kennlinie. Ziel ist es, sicherzustellen, dass sie ein plausibles, konsistentes und reproduzierbares Verhalten des Agenten gewährleistet. Die Validierung erfolgt durch Testläufe auf Agentenebene durch Abgleich der resultierenden Wirkungsgrade mit Referenzwerten aus Literatur oder Herstellerangaben (je nach verfügbarer Datenbasis). Ergänzend werden Sensitivitätsanalysen vorgeschlagen, um die Robustheit des Verhaltens der Kennlinie gegenüber Parametervariation abzusichern.

3.5 Anwendungsbeispiel

Zur Veranschaulichung des zuvor beschriebenen Prozessablaufs (Kapitel 3.3), liegt in diesem Kapitel der Fokus auf dem konkreten Technologiebeispiel Wärmepumpe. Grundsätzlich lässt sich der Prozess allerdings technologieübergreifend anwenden.

3.5.1 Anwendungsfall definieren

Als Anwendungsfall wird in diesem Beitrag die Technologie Wärmepumpe betrachtet, um die Anwendung des End-to-End-Prozesses zu erläutern. Wärmepumpen können als Energiewandler definiert werden und wirken mithilfe von Umweltwärme sowohl im Bereich Wärme (Nutzenergieform) als auch im Bereich Strom (aufgewendete Energieform). Der Wirkungsgrad von Wärmepumpen wird als COP (coefficient of performance) beschrieben. Die Berechnung erfolgt anhand standardisierter Laborbedingungen nach DIN EN 14511 und setzt die erhaltene Nutzenergie (Q_{nutz}) ins Verhältnis zur aufgewendeten Energie (P_{el}) [13].

$$COP = \frac{Q_{\text{nutz}}}{P_{\text{el}}}$$

In diesem Beispiel ist eine Clusterung nach der verwendeten Wärmequelle sinnvoll, klassischerweise wird hier zwischen Wasser, Sole und Luft unterschieden. Auch eine Clusterung nach Leistungsklasse wird benötigt, da sich der COP von Großwärmepumpen anders verhält als Wärmepumpen, die in Einfamilienhäusern eingesetzt werden [14].

Bezüglich des Simulationsziels liegt der Fokus auf dem kosteneffizienten Betrieb des Gesamtenergiesystems. Abgeleitet aus dem übergeordneten Gesamtsystem erhält der Agent Wärmepumpe auf Basis der aktuellen Betriebskosten (Strompreis in €/kWh) und dem Wärmebedarf einen vorgeschriebenen Fahrplan für die zu er-

zeugende Wärmemenge. Die Wärmepumpe fährt diesen Fahrplan ab und mithilfe des Wirkungsgrades (COP) wird die dafür aufgewendete Energie berechnet.

3.5.2 Bestimmung relevanter Merkmale und Parameter zur Wirkungsgradkennlinienerstellung

Um dieses Anwendungsbeispiel umzusetzen, werden Parameter benötigt, die den Agent Wärmepumpe charakterisieren. Um den durch das Gesamtsystem vorgeschriebenen Fahrplan abfahren zu können, müssen Restriktionen der Wärmepumpe bei der Fahrplannerstellung berücksichtigt werden. Diese Restriktionen umfassen beispielsweise den Leistungsbereich der Wärmepumpe (zum Beispiel 30 % bis 100 % der maximalen Leistung). Zudem muss der Betriebsmodus definiert werden. Der Agent Wärmepumpe kann die Modi „ein“, „aus“ sowie im Zustand „ein“ den zuvor definierten Leistungsbereich stufenlos abfahren.

Größen, die den Wirkungsgradverlauf maßgeblich beeinflussen, sind die Quelltemperatur, die Art der Wärmequelle (etwa Außenluft oder Koordinaten des Standorts) und die Vorlauftemperatur. Weitere Einflussgrößen sind das verwendete Kältemittel, der Kompressortyp oder die Fähigkeit der Wärmepumpe, auch für die Klimatisierung eingesetzt werden zu können. Diese genannten weiteren Einflussgrößen werden im Anwendungsbeispiel jedoch bewusst ausgeklammert, da hier ein kosteneffizientes Gesamtsystem das Simulationsziel ist und nicht die detaillierte Betrachtung einzelner Energiesystemkomponenten. Daher werden im Anwendungsbeispiel die Quell- und die Vorlauftemperatur als einzige relevante Einflussgrößen definiert. Diese Parameter werden in der agentenbasierten Modellstruktur implementiert und der entsprechenden Agentenklasse Wärmepumpe zugeordnet.

3.5.3 Funktionsdarstellung der Wirkungsgradkennlinie

Liegen ausreichend Daten vor, können Regressionsanalysen zur Ermittlung der Wirkungsgradfunktionen eigenständig durchgeführt und gegebenenfalls mit der Literatur verglichen werden. Im betrachteten Anwendungsfall wird beispielhaft auf bereits entwickelte Wirkungsgradkennlinien aus der Literatur zurückgegriffen. Im Beitrag von *Kemmler* und *Thomas* [15], werden Leistungsdaten auf Basis von Korrelationsfunktionen entwickelt. Die Kennlinien werden mithilfe von Herstellerdaten aus 65 Datenblättern erstellt. Der Funktionsraum dieser Kennlinien beschränkt sich auf Luft-Wasser- und Sole-Wasser-Wärmepumpen. Die Kennlinien des COP für Luft-Wasser-Wärmepumpen sind für Quelltemperaturen zwischen -5 °C und 25 °C geeignet. Die Vorlauftemperaturen beschränken sich auf den Bereich zwischen 35 °C und 65 °C . Temperaturen außerhalb dieses definierten Funktionsraums müssen extrapoliert werden, um eine stetige Funktion zu erhalten. Für die Entwicklung der Korrelationsfunktionen werden die verfügbaren Wärmepumpen in die Leistungsklassen $5\text{--}18\text{ kW}_{\text{th}}$, $18\text{--}35\text{ kW}_{\text{th}}$, $35\text{--}80\text{ kW}_{\text{th}}$ und $>80\text{ kW}_{\text{th}}$ geclustert [15].

Die Kennlinien des COPs von Luft-Wasser-Wärmepumpen lassen sich durch eine Polynomfunktion 2. Grades abbilden. Dadurch kann auch der Enteisungsprozess berücksichtigt werden. Die Kennlinien des COPs von Sole-Wasser-Wärmepumpen (SWP) hingegen verhalten sich nahezu linear. Im weiteren Verlauf wird zur Verdeutlichung des Vorgehens nur auf die Sole-Wasser-Wärmepumpen eingegangen, da das Vorgehen zur Ermittlung der Kennlinien der Luft-Wasser-Wärmepumpe identisch ist.

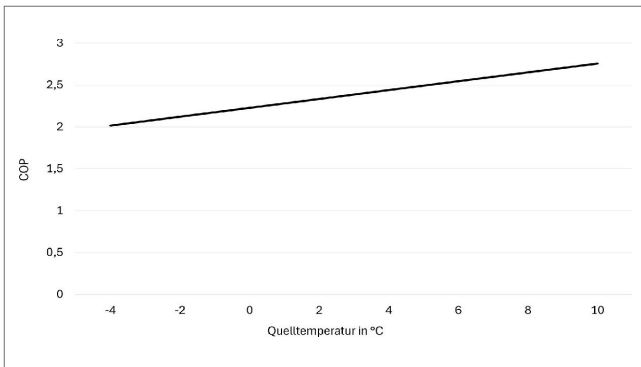


Bild 3 Korrelationsfunktion einer Sole-Wasser-Wärmepumpe (Leistungs-klasse 35–80 kW_{th} und 65 °C Vorlauftemperatur), Wirkungsgrad COP = coefficient of performance. Grafik: in Anlehnung an [15]

Die lineare Funktion der Sole-Wasser-Wärmepumpe kann wie folgt abgebildet werden:

$$COP_{SWP} = 7,49233 - 0,08100 \cdot T_{VL} + 0,18945 \cdot T_{Quelle} - 0,00210 \cdot T_{VL} \cdot T_{Quelle}$$

Zusätzlich ist, neben den linearen Gliedern der Funktion auch ein gemischtes Glied für die Quell- und die Vorlauftemperatur (VL) vorhanden. Hiermit können mögliche Abhängigkeiten zwischen den beiden Temperaturen berücksichtigt werden. Die Koeffizienten ergeben sich aus einer linearen Regressionsanalyse und werden für jede Leistungsklasse separat ermittelt. **Bild 3** stellt beispielhaft die Korrelation für eine Sole-Wasser-Wärmepumpe in der Leistungsklasse 35–80 kW_{th} bei 65 °C Vorlauftemperatur dar [15].

Die dazugehörigen Koeffizienten der Funktion lauten:

$$COP_{SWP} = 7,49233 - 0,08100 \cdot T_{VL} + 0,18945 \cdot T_{Quelle} - 0,00210 \cdot T_{VL} \cdot T_{Quelle} \quad (T \text{ in } ^\circ\text{C})$$

3.5.4 Übergabe an Agenten

Die Funktionen des COP müssen nun im Agent Wärmepumpe eingebettet werden. Die Zuordnung zur benötigten Funktion der Wärmepumpentechnologie und der entsprechenden Leistungs-klasse kann über klassische if-/else-Zweige erfolgen. Zudem muss die Funktion mit den Parametern Quell- und Vorlauftemperatur verknüpft werden. In **Bild 4** wird die Integration in ein agenten-basiertes Modell beispielhaft dargestellt.

Der Parameter „maxLeistungsabgabe“ definiert die Leistungs-klasse Q_{nehm}, der Parameter „wpArt“ beschreibt, ob es sich um eine Sole-, Luft- oder Wasser-Wasser-Wärmepumpe handelt. Dementsprechend wird entlang der if-/else-Zweige der Funktion „berechnungCOP“ der „aktuellerCOP“ kalkuliert.

3.5.5 Validierung der Wirkungsgradkennlinie

Nun gilt es, die Implementierung der Kennlinienfunktionen zu prüfen. Die Validierung ist im Folgenden nicht als vollständig zu betrachten. Lediglich einzelne Ausschnitte werden beispielhaft dargestellt. Zunächst ist die Verknüpfung in das Gesamtsystem zu validieren. Im definierten Anwendungsfall können zum Beispiel folgende Testfälle geprüft werden:

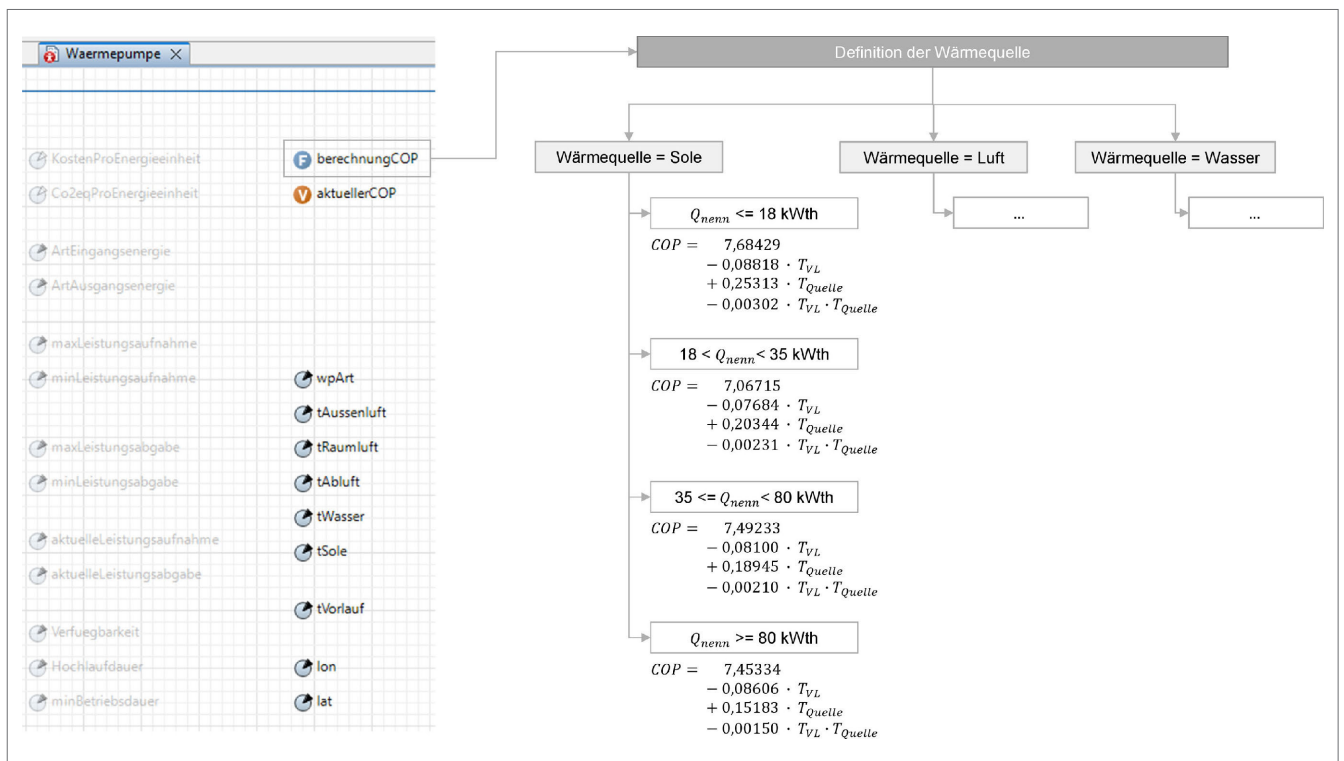


Bild 4 Einbindung von Wirkungsgradkennlinien in ein Multi-Agenten-Simulationsmodell eines Energiesystems in der Modellierungsumgebung „AnyLogic“. Grafik: IFF Uni Stuttgart, Campus Schwarzwald

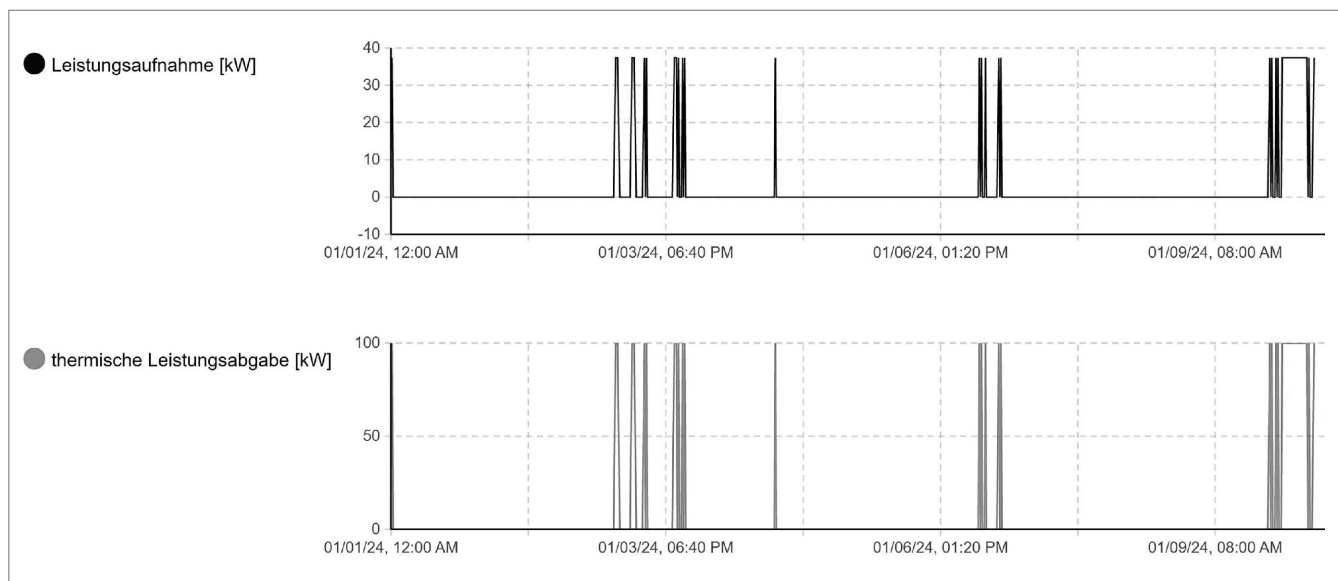


Bild 5 Beispielhafte Darstellung der Leistungsabgabe nach vorgegebenem Fahrplan und der über den COP berechneten Leistungsaufnahme einer Sole-Wärmepumpe ($100 \text{ kW}_{\text{th}}$). Grafik: IFF Uni Stuttgart, Campus Schwarzwald

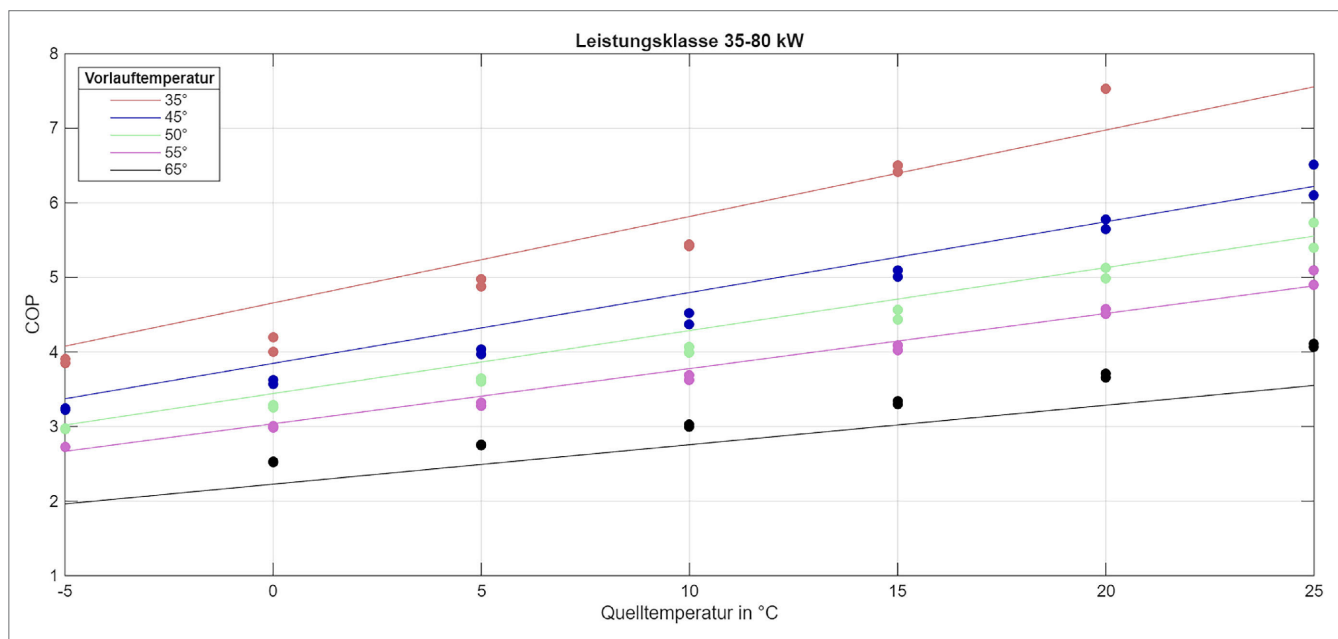


Bild 6 Grafischer Vergleich zwischen entwickelter Funktion und Referenzwärmepumpen. Grafik: IFF Uni Stuttgart, Campus Schwarzwald

1. Der durch das Gesamtsystem vorgegebene Fahrplan wird korrekt ausgeführt (**Bild 5**)
2. Die benötigte elektrische Leistungsaufnahme geht in die elektrische Energiebilanz als Verbraucher ein
3. Die erzeugte thermische Leistung zahlt in die thermische Energiebilanz ein.
4. Die entstehenden Kosten durch den Strombedarf des Wärmepumpenbetriebs werden korrekt kalkuliert.

Nun erfolgt die Validierung der Wirkungsgradkennlinie in der agentenbasierten Simulation. Entscheidend ist dabei, ob die Kalkulation des COP das erwartete Verhalten aufweist oder nicht. Um dies bewerten zu können, sollten die kalkulierten Wirkungsgrade mit Herstellerdaten verglichen werden. Dieser Vergleich wird im Rahmen des Anwendungsbeispiels durchgeführt.

Die zuvor beispielhaft genannte Funktion für die Sole-Wasser-Wärmepumpe der Leistungsklasse $35\text{--}80 \text{ kW}_{\text{th}}$ wird mit weiteren Herstellerdaten verglichen, **Bild 6**.

Der Vergleich zeigt, dass Abweichungen zwischen der von Kemmler und Thomas [15] entwickelten Funktion (als Linie dargestellt) und den Herstellerdatenpunkten der beiden Referenzwärmepumpen vorliegen. Diese Abweichung ist bei den beiden Vorlauftemperaturen im Randbereich (35°C und 65°C) stärker ausgeprägt als bei den weiteren getesteten Vorlauftemperaturen. Bei Quelltemperaturen ab 20°C zeigen die Referenzwärmepumpen eine deutlich höhere Effizienz als in den Korrelationsfunktionen abgebildet. Diese Quelltemperaturen treten in der Praxis bei Sole-Wasser-Wärmepumpen selten auf. Durchschnittlich ist der COP der Referenzwärmepumpen kleiner als in der Korrelations-

funktion abgebildet. *Kemmler* und *Thomas* geben für die von ihnen entwickelten Funktionen einen Median aller Abweichungen von 4,9% an. Dieser liegt bei den Referenzwärmepumpen im Vergleich zur Funktion bei 5,8%. Im definierten Anwendungsbeispiel kann diese Abweichung akzeptiert werden, denn die korrekte Größenordnung ist im Vergleich mit einzelnen Referenzpunkten ausreichend [16].

Treten beim Vergleich mit mehreren Referenzwärmepumpen größere Abweichungen auf, müssen die entwickelten Wirkungsgradfunktionen optimiert werden. Im Beispiel der entwickelten Funktionen von *Kemmler* und *Thomas* betrifft dies die Leistungsklasse $\geq 80 \text{ kW}_{\text{th}}$. Die Funktion in dieser Leistungsklasse wurde von *Kemmler* und *Thomas* auf Basis von zwei Wärmepumpen entwickelt. Dem Vergleich mit mehreren Referenzwärmepumpen kann die Wirkungsgradfunktion nicht standhalten (Median aller Abweichungen von 7,3%). Deshalb werden für diese Leistungsklasse mithilfe einer größeren Datenbasis von 16 Wärmepumpen über eine Regressionsanalyse eigene Koeffizienten entwickelt:

$$\begin{aligned} COP_{SWP, \geq 80 \text{ kW}_{\text{th}}} = & 6,5578 - 0,0653 \cdot T_{VL} + \\ & 0,2007 \cdot T_{Quelle} - 0,0022 \cdot T_{VL} \cdot T_{Quelle} \end{aligned}$$

(T in °C)

Der Median aller Abweichungen liegt nun in einem akzeptablen Bereich von 3,7%. Anschließend müssen die optimierten Funktionen im entsprechenden Agenten implementiert werden (siehe Abschnitt 3.5.4 Übergabe an Agenten).

4 Diskussion

In der Praxis lassen sich Funktionen zur Wirkungsgradberechnung effizient und einfach in agentenbasierte Simulationen implementieren. Sie können wie Parameter oder Variablen in einem Agenten integriert und ausgeführt werden. Durch das Ausführen der Funktion lässt sich der aktuelle Wirkungsgrad kontinuierlich zur Simulationslaufzeit effizient neu berechnen. Im Gegensatz dazu ist etwa in Lookup-Tabellen die zu speichernde Datenmenge oft größer und kann durch den Datenbankabruf zu einer längeren Simulationsberechnungszeit führen.

Allerdings gibt es auch Grenzen der vorgestellten Modellierungsmethodik. Um valide Kennlinien entwickeln zu können, ist eine ausreichende Datenbasis etwa aus Hersteller- oder Realdaten erforderlich. Abhängig von der Technologie kann die Verfügbarkeit einer belastbaren Datenbasis für die Ableitung von Wirkungsgradkennlinien in der Praxis eingeschränkt sein. Das sind vor allem Technologien, die noch nicht in größerem Maßstab am Markt etabliert sind. In diesem Fall sind die notwendigen Daten zur Kennlinienmodellierung im Vorfeld messtechnisch zu erfassen.

Auch bei Technologien mit einem stark dynamischen Verhalten ist diese Modellierungsmethodik bei hohen Anforderungen an die Modellgüte nicht immer sinnvoll. Jedoch kann eine Taktung beispielsweise in der agentenbasierten Modellierung leicht über Funktionen abgebildet werden. Insgesamt ist die Modellierungsmethodik dann anzuwenden, wenn eine Vielzahl an Technologien in sektorgekoppelten Energiesystemen abgebildet werden sollen.

5 Zusammenfassung und Ausblick

In diesem Beitrag wurde eine Modellierungsmethodik vorgestellt, die eine effiziente und konsistente mathematische Abbildung von Wirkungsgradkennlinien von Agenten in agentenbasierten Energiesystemsimulationen ermöglicht. Der Ansatz adressiert die Herausforderung, komplexe Multi-Energy-Systeme mit vertretbarem Modellierungsaufwand abzubilden, ohne die nötige Modellgüte für aussagekräftige Analysen zu unterschreiten. Durch die Abstraktion wirkungsgradbezogener Merkmale und deren Überführung in simulationsfähige Funktionen wird eine deutliche Vereinfachung der Agentenparametrisierung erreicht. Die vorgestellte Methodik erlaubt es, den Zielkonflikt zwischen Modellierungsaufwand und Abbildungsgenauigkeit zu entschärfen. Die Trennung zwischen generischem Modellierungsansatz und technologiespezifischer Anwendung trägt zur Wiederverwendbarkeit und Erweiterbarkeit des entwickelten Ansatzes bei.

Perspektivisch bietet sich die Möglichkeit, auf Basis der vorgestellten Methodik ein automatisches Modellierungssystem zu entwickeln. Vor dem Hintergrund wachsender Systemkomplexität und steigender Anforderungen an Energiesystemsimulationen stellt die automatisierte Modellerstellung ein wichtiges künftiges Forschungsthema dar. Ein solcher Ansatz könnte Agenten automatisiert erzeugen und parametrisieren. Vor allem die automatisierte Auswahl des jeweils sinnvollsten mathematischen Beschreibungsansatzes der Kennlinien im Hinblick auf Modellgüte und Rechenaufwand ist dabei von simulationspraktischem Interesse.

FÖRDERHINWEIS

Europäischen Fonds für regionale Entwicklung (EFRE),
Ministerium für Ernährung, ländlichen Raum und Verbraucherschutz (MLR), Vorhaben Nr. 2452419

Literatur

- [1] Klein, M.; Frey, U. J.; Reeg, M.: Models Within Models — Agent-Based Modelling and Simulation in Energy Systems Analysis. *Journal of Artificial Societies and Social Simulation* 22 (2019) 6, <https://doi.org/10.18564/jasss.4129>
- [2] Wirtz, M.; Hahn, M.; Schreiber, T. et al.: Design optimization of multi-energy systems using MILP: Which model complexity and level of detail is sufficient? *Energy Conversion and Management* 240 (2021), #114249, <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2021.114249>
- [3] Yao, R.; Hu, Y.; Varga, L.: Applications of Agent-Based Methods in Multi-Energy Systems—A Systematic Literature Review. *Energies* 16 (2023) 5, pp. 1–36, <https://doi.org/10.3390/en16052456>
- [4] Grimm, V.; Railsback, S. F.; Vincenot, C. E. et al.: The ODD Protocol for Describing Agent-Based and Other Simulation Models: A Second Update to Improve Clarity, Replication, and Structural Realism. *Journal of Artificial Societies and Social Simulation* 23 (2020) 2, #7, <https://doi.org/10.18564/jasss.4259>
- [5] Wang, Y.; Zhang, N.; Kang, C.; et al.: Standardized Matrix Modeling of Multiple Energy Systems. *IEEE Transactions on Smart Grid* 10 (2019) 1, pp. 257–270, <https://doi.org/10.1109/TSG.2017.2737662>
- [6] Fraunhofer ISE: Nationales Energiesystemmodell mit Fokus auf Intersektorkopplung. Modelldokumentation: „REMod“ Stand: 2024. Internet: www.ise.fraunhofer.de/de/geschaeftsfelder/systemintegration/energiesystemanalyse/energiesystemmodelle-am-fraunhofer-ise/remod.html. Zugriff am 20.03.2026
- [7] Weck-Ponten, S.; Frisch, J.; van Treck, C.: Simplified heat pump system model integrated in a tool chain for digitally and simulation-based

- planning shallow geothermal systems. *Geothermics* 106 (2022), #102579, <https://doi.org/10.1016/j.geothermics.2022.102579>
- [8] Ruschenburg, J.; Cutic, T.; Herkel, S.: Validation of a black-box heat pump simulation model by means of field test results from five installations. *Energy and Buildings* 84 (2014), pp. 506–515, <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2014.08.014>
- [9] Jin, H.; Spitler, J.D.: A parameter estimation based model of water-to-water heat pumps for use in energy calculation programs. *ASHRAE Transactions* 108 (2002), part 1
- [10] Sperber, E.: Grey-Box-Modellierung des thermischen Verhaltens von Typgebäuden. Internationale Energiewirtschaftstagung, Wien. Stand: 2019. Internet: http://elib.dlr.de/126579/1/Sperber_IEWT_Grey-Box-Modellierung%20Typgeb%C3%A4ude_LFv4.pdf. Zugriff am 20.03.2026
- [11] Asensio, F.; San Martín, J. I.; Zamora, I. et al.: Analysis of electrochemical and thermal models and modeling techniques for polymer electrolyte membrane fuel cells. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 113 (2019), #109283, <https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.109283>
- [12] Stachowiak, H.: Allgemeine Modelltheorie. New York: Springer-Verlag 1973
- [13] Endrullat, K.; Epinatjeff, P.; Petzold, D. et al.: Grundlagen für Wärmepumpen. In: Endrullat, K.; Epinatjeff, P.; Petzold, D. et al. (Hrsg.): *Wärmetechnik*. Heidelberg: Springer-Verlag 1987, S. 335–355
- [14] Tiator, I.; Schenker, M.: *Wärmepumpen. Wärmepumpenanlagen*. Würzburg: Vogel Business Media 2014
- [15] Kemmler, T.; Thomas, B.: Simulation von Wärmepumpensystemen auf der Grundlage von Korrelationsfunktionen für die Leistungsdaten der Wärmepumpe. 16. Symposium Energieinnovation, Graz, 2020, S. 4–7
- [16] N. N.: *Vitocal Sole/Wasser-Wärmepumpen 2- und 3-stufig, 27,3 bis 197,9 kW*. Firmenbroschüre. Allendorf (Eder): Viessmann Holding International GmbH 2022

Marco Maier, M.Sc. 

marco.maier@iff.uni-stuttgart.de

Institut für Industrielle Fertigung und Fabrikbetrieb IFF
Universität Stuttgart
Nobelstr. 12, 70569 Stuttgart
www.iff.uni-stuttgart.de

Janica Bortloff, M.Sc.

janica.bortloff@campus-schwarzwald.de

Joaquim Navarro Oster, B.Sc.

Centrum für Digitalisierung, Führung
und Nachhaltigkeit Schwarzwald gGmbH
Herzog-Eberhard-Str. 56, 72250 Freudenstadt
www.campus-schwarzwald.de

LIZENZ



Dieser Fachaufsatz steht unter der Lizenz Creative Commons
Namensnennung 4.0 International (CC BY 4.0)