



Agentenbasierte Modellierung urbaner Transformationsprozesse

Smart Utilities and Sustainable Infrastructure Change

Thomas Bruckner, Simon Johanning, Stefan Kühne,
Fabian Scheller (Hrsg.)





UNIVERSITÄT
LEIPZIG



InfAI®
Institut für Angewandte Informatik

Agentenbasierte Modellierung urbaner Transformationsprozesse

Smart Utilities and Sustainable Infrastructure Change

Thomas Bruckner, Simon Johanning, Stefan Kühne,
Fabian Scheller (Hrsg.)

Diese Maßnahme wird mitfinanziert
durch Steuermittel auf der Grund-
lage des vom Sächsischen Landtag
beschlossenen Haushaltes.



Studien zu Infrastruktur und Ressourcenmanagement

Herausgegeben von

Thomas Bruckner, Erik Gawel, Robert Holländer, Daniela Thrän

Band 12

Studien zu Infrastruktur und Ressourcenmanagement
Studies on Infrastructure and Resources Management

Herausgegeben von
Thomas Bruckner, Erik Gawel, Robert Holländer, Daniela Thrän
Universität Leipzig
Wirtschaftswissenschaftliche Fakultät
Institut für Infrastruktur und Ressourcenmanagement
Grimmaische Strasse 12
04109 Leipzig
Tel.: +49(0)341 / 9733 516
E-Mail: bruckner@wifa.uni-leipzig.de
<http://www.wifa.uni-leipzig.de/iirm>

Bild Titelseite: Christian Hüller.

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek:

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

©Copyright Logos Verlag Berlin GmbH 2022
Alle Rechte vorbehalten.

ISBN 978-3-8325-5413-2
ISSN 2191-9623

Logos Verlag GmbH
Georg-Knorr-Str. 4, Geb. 10
D-12681 Berlin
Tel.: +49(0)30 / 42 85 10 90
<http://www.logos-verlag.de>



Inhaltsverzeichnis

Vorwort	1
I. Hintergrund und Zielsetzung	
Integrierte techno-sozio-ökonomische Modellierung urbaner Systeme	7
II. Fachliche Konzepte	
Beschreibung der realen Fallstudien als Forschungsobjekt für die modellbezogenen Analysen	21
Modellierung von haushaltsseitigen Entscheidungsprozessen zur Adoption von Aufdach-Photovoltaik: Theorie und Umsetzung	39
Entscheidungsverhalten von Wohnungsunternehmen bei grundstücksbezogenen Regenwasserbewirtschaftungsanlagen	51
Szenarien für den zukünftigen Ausbau von Photovoltaik im kommunalen Bereich	65
Regionalwirtschaftliche Wertschöpfungseffekte aus dem Betrieb von Photovoltaikanlagen innerhalb einer Kommune	75
III. Softwaretechnische Umsetzung	
Architektur und Umsetzung des Multi-Agenten-Modells zur Diffusion von Nachhaltigkeitsinnovationen	91

IRPsim – Eine webbasierte Ausführungsinfrastruktur für Energiesystemmodelle	105
IRPsim – Eine Softwareumgebung zur Kopplung von Energiesystemmodellen	117
IV. Empirische Untersuchungen	
Empirische Verankerung der Haushaltsagenten und ihres Photovoltaik-Investitionsverhaltens	129
PVactVal: Ein Ansatz für die operationale Validierung von Aufdach-PV Diffusionsmodellen	139
Empirische Untersuchung zum Entscheidungsverhalten von Wohnungsunternehmen und Konzeptmodell	153

Vorwort

Thomas Bruckner¹, Simon Johanning¹, Fabian Scheller², Stefan Kühne^{3/4}

Im Kontext der Energiewende stellt sich für viele kommunale Energieversorger die zentrale Frage, in welcher Geschwindigkeit diese Unternehmen auf neue Geschäftsmodelle (z.B. im Bereich der Nutzung erneuerbarer Energien oder der Umsetzung von dezentralen Maßnahmen zur Förderung der Energieeffizienz) setzen sollen, die zumindest kurzfristig negative Auswirkungen auf ihr klassisches Kerngeschäft (den Vertrieb von Strom, Gas und Fernwärme) erwarten lassen. Die hier beschriebene Situation ist vergleichbar mit der Situation der Automobilhersteller, die sich fragen, in welcher Geschwindigkeit sie auf die Elektromobilität setzen sollen, wohl wissend, dass dies temporär negative Auswirkungen auf das klassische Kerngeschäft haben kann. Kommunale Versorgungsunternehmen sind im Kontext der Energiewende prospektiv zentrale Akteure in Bezug auf die sichere und zunehmend umweltverträglichere Bereitstellung von Infrastrukturdienstleistungen. Erst wenn sichergestellt ist, dass sich diesbezügliche Investitionen „wirtschaftlich rechnen“, kann auf eine Realisierung der entsprechenden Transformation der Infrastruktursysteme gehofft werden.

Das Verbundprojekt „Smart Utilities and Sustainable Infrastructure Change (SUSIC)“ zielt aus diesem Grund auf die Entwicklung einer digitalen Simulationsplattform, die als virtuelles Experimentallabor zum Test und zur Bewertung neuer Geschäftsmodelle im Bereich der kommunalen Energieversorgung herangezogen werden kann. Die Durchführung des Projektes, über dessen Ergebnisse in diesem Band der „Studien zu Infrastruktur

¹Institut für Infrastruktur und Ressourcenmanagement, Universität Leipzig

²Department of Technology, Management and Economics, Technical University of Denmark

³Universitätsrechenzentrum Leipzig

⁴Institut für Angewandte Informatik e. V.

und Ressourcenmanagement“ berichtet wird, erfolgte in einem interdisziplinären Team, das aus fünf Professuren der Universität Leipzig sowie Mitarbeitern des Instituts für angewandte Informatik (InfAI) bestand.

Zusätzlich zur Energieversorgung und vergleichend hierzu wurde auch der wasserwirtschaftliche Bereich betrachtet. Die Siedlungswasserwirtschaft steht insbesondere in Bezug auf das urbane Regenwassermanagement ebenfalls unter einem starken Veränderungsdruck, um auf die Folgen des Klimawandels und die oft stattfindende Nachverdichtung im urbanen Raum sowie damit einhergehende Überflutungsrisiken und urbane Überhitzungsprobleme reagieren zu können. Hierfür bietet es sich an, das Regenwasser verstärkt grundstücksbezogen zu bewirtschaften, z. B. über Gründächer und Versickerungslösungen. Die privaten und kommunalen Wohnungsunternehmen bzw. Genossenschaften besitzen aufgrund ihrer Größe und aufgrund der Tatsache, dass ihre Gebäude häufig in dicht besiedelten Stadtteilen liegen, diesbezüglich besondere Möglichkeiten. Die damit verbundenen Vorteile und Nachteile stehen im Zentrum der wasserwirtschaftlichen Analysen im SUSIC Projektverbund.

Im Zentrum des Forschungsprojektes SUSIC stand in wissenschaftlicher Hinsicht vor dem beschriebenen energiewirtschaftlichen und siedlungswasserwirtschaftlichen Hintergrund die Modellierung und integrierte Bewertung kommunaler und regionaler Infrastruktursysteme zur Bereitstellung von Energie sowie zur Entsorgung von Abwasser, die von heterogenen Akteuren betrieben und im Zeitverlauf durch Investitions- und Rückbauentscheidungen verändert werden. Hierbei kommt es typischerweise zu einer Interaktion zwischen zentralen Akteuren (z.B. Versorgungs- und Entsorgungsunternehmen bzw. der Kommunalverwaltung) und einer Vielzahl von dezentralen Akteuren, die die Infrastrukturdienstleistungen nachfragen und zunehmend auch selbst (z.B. durch eine dezentrale Stromerzeugung oder gebäudebezogene Regenwasserentsorgung) bereitstellen. Insbesondere die Flexibilität einer schnell steigenden Anzahl von Prosumenten (d.h. Stromnachfrager, die z.B. mit Hilfe von Photovoltaikanlagen dezentral Strom erzeugen, um diesen zu verbrauchen, zeitweise zu speichern, oder ins Netz einzuspeisen) stellt eine wachsende Herausforderung für die Infrastrukturplanung dar, die bisher noch nicht angemessen adressiert werden kann. Eine Erweiterung der techno-ökonomischen Systemebene der bisher eingesetzten Planungsinstrumente durch eine sozio-ökonomische Akteurebene, die das Verhalten dieser neuartigen Akteursgruppe adäquat

abzubilden versucht, kann hier Abhilfe schaffen.

Das Projekt gliederte sich aus diesem Grund in fünf Teilprojekte, die die Entwicklung und softwaretechnische Realisierung einer generischen Plattform zur agentenbasierten Modellierung dezentraler Akteure im Bereich der Energie- und Wasserwirtschaft, die Modellierung von Entscheidungslogiken dezentraler Akteure im Energiebereich und der Siedlungswasserwirtschaft sowie die regionalwirtschaftlichen Effekte dieser Transformation umfassten. In Ergänzung zu dem am Institut für Infrastruktur und Ressourcenmanagement bereits vorhandenen Modell zur integrierten Modellierung urbaner (Energie-)Versorgungsunternehmen (Integrated Resource Planing - IRPopt) wurde im Rahmen des SUSIC Projektverbundes eine Agentenplattform (Integrated Resource Planing & Interaction, kurz IRPact) zur Abbildung verschiedener Akteure aus dem Bereich der Energie- und Wasserwirtschaft erstellt. Der Fokus lag dabei auf dem generischen Charakter der agentenbasierten Simulation. Das Programm der Agentensimulation wurde aus diesem Grund basierend auf einer mehrstufigen Architektur entworfen, welche einen hohen Abstraktionsgrad erlaubt.

Zu den Projektpartnern, die an der Universität Leipzig sowie am InfAI fakultätsübergreifend zusammengearbeitet haben, gehörten die Professur für Energiemanagement und Nachhaltigkeit (Projektleitung), die Professur für Umwelttechnik/Umweltmanagement (beide am Institut für Infrastruktur und Ressourcenmanagement - IIRM der Wirtschaftswissenschaftlichen Fakultät), die Professur für Schwarmintelligenz und Komplexe Systeme (Fakultät für Mathematik und Informatik), die Professur für Informationsmanagement (Institut für Wirtschaftsinformatik der Universität Leipzig sowie InfAI Leipzig) sowie die Professur für Finanzwissenschaft am Institut für öffentliche Finanzen und Public Management der Wirtschaftswissenschaftlichen Fakultät. Das fakultätsübergreifende und in seiner umfassenden Form hochschulübergreifende Kooperationsprojekt "Smart Utilities and Sustainable Infrastructure Change (SUSIC)" gehört zu den beiden Leuchtturmprojekten, die im Rahmen der Etablierung des Research Centers for Smart and Sustainable Infrastructures (RCI) als forschungsbezogene 3. Säule des Digital Hubs Smart Infrastructure Leipzig vom Freistaat Sachsen gefördert wurden.

Die im Folgenden wiedergegebenen Beiträge des hier vorliegenden Sammelbandes beschreiben die Ergebnisse der unterschiedlichen Arbeitspakete

im Projekt „Smart Utilities and Sustainable Infrastructure Change“. Die Editoren dieser zusammenfassenden Projektdarstellung danken allen Projektpartnern und Autoren der Kapitel dieses Sammelbandes für die sehr konstruktive Zusammenarbeit im Projekt sowie im Rahmen der Erstellung dieses Endberichts. Besonders bedanken möchten wir uns beim Freistaat Sachsen für die Finanzierung des Projekts aus Mitteln des von den Abgeordneten des Sächsischen Landtags beschlossenen Haushaltes sowie bei der Sächsischen Aufbaubank (SAB) für die exzellente Begleitung des Projekts im Rahmen der Projektträgerschaft. Unser besonderer Dank gilt insbesondere allen wissenschaftlichen Mitarbeiter:innen für ihr außerordentliches Engagement in allen Teilprojektbereichen. Ohne ihre Begeisterung für das Projekt und ihre Beiträge dazu wäre ein erfolgreicher Projektabschluss nicht denkbar gewesen.

Herzlichen Dank dafür im Namen aller Teilprojektleiter von uns als Editoren dieses Bandes

T. Bruckner, S. Johanning, F. Scheller, S. Kühne

Diese Maßnahme wird mitfinanziert durch Steuermittel auf der Grundlage des vom Sächsischen Landtag beschlossenen Haushaltes.



Teil I.

Hintergrund und Zielsetzung

Integrierte techno-sozio-ökonomische Modellierung urbaner Systeme

Fabian Scheller¹, Simon Johanning², Thomas Bruckner²

Städte oder Regionen sind keine statischen Gebilde, sondern dynamische Systeme, in denen zahlreiche verschiedene Akteure in Beziehung treten, deren Entwicklung durch externe Faktoren (z. B. den Klimawandel, demographische Veränderungen sowie politische und ökonomische Rahmenbedingungen) beeinflusst wird und gleichzeitig durch interne Prozesse (z. B. durch Entscheidungen der Verwaltung, aber insbesondere auch durch das konkrete Verhalten der Bürger vor Ort) endogen beeinflusst werden kann. Die heute im Einsatz befindlichen Instrumente zur Stadtplanung und Stadtentwicklung (z. B. integrierte Stadtentwicklungskonzepte) sind ein Ausdruck dieses Verständnisses. In den letzten Jahren wurde viel dazu geforscht, wie durch partizipative Ansätze Kooperationshemmnisse abgebaut und Transformationsprozesse erleichtert werden können (z. B. insbesondere im Kontext der Innovations- und Forschungsagenda Zukunftsstadt der Bundesregierung³). Übersehen wird im Hinblick auf die Transformation urbaner und regionaler Infrastruktursysteme aber oft, dass das energie-, siedlungswasserwirtschaftliche und klimapolitische Gestaltungsvermögen der Kommunalverwaltung begrenzt ist.

Viele Innovationen für Nachhaltigkeitstransformationen im Energiebereich und bei der Siedlungswasserwirtschaft erfolgen auf privaten Grundstücken und somit nicht im öffentlichen Raum. Dies erfordert es, mit den Grundstückseigentümern eine große und heterogene Akteursgruppe in die Infrastrukturentwicklung einzubeziehen, die durch spezifische Handlungs- und Entscheidungslogiken gekennzeichnet sind und die in ihren Entscheidungen auch weitgehend autonom sind. Übersehen wird zugleich nicht selten,

¹Department of Technology, Management and Economics, Technical University of Denmark

²Institut für Infrastruktur und Ressourcenmanagement, Universität Leipzig

³Vgl. Bundesministerium für Bildung und Forschung, 2015.

dass es im Energie- und Wasserbereich neben den Aktivitäten der Bürger vor Ort (z. B. im Bereich der Wärmedämmung oder im Hinblick auf die Nutzung dezentraler Anlagen zur Energiever- und Abwasserentsorgung) vor allem die Ver- und Entsorgungsbetriebe sind, die mit ihren kontinuierlichen Investitionsentscheidungen die Entwicklung der kommunalen und regionalen Infrastruktur maßgeblich beeinflussen.

Während es in Bezug auf die Erstellung kommunaler Klimaschutzkonzepte eine Fülle von hierfür einsetzbaren Energiesystemoptimierungsmodellen gibt und in Bezug auf privatwirtschaftliche Investitionsentscheidungen im Bereich der Energieberatung auf Gebäudesimulationsmodelle und Ertragsmodelle für den Betrieb von Anlagen zur Nutzung erneuerbarer Energien zurückgegriffen werden kann, fehlen einfach zu handhabende integrierte Computermodelle, die es Versorgungsbetrieben erlauben, im Kontext unsicherer wirtschaftlicher und politischer Rahmenbedingungen den Erfolg (z. B. Reduktion der CO₂-Emissionen, Erhalt der Leistungsfähigkeit gegenüber Bürgern, Bezahlbarkeit und Resilienz), den Zusatznutzen (z. B. Wertschöpfungs- und Arbeitsplatzeffekte, persönliche Identifikation) und die Risiken (z. B. finanziell) zu bewerten, die mit der Umsetzung von Vorhaben zur Transformation urbaner und regionaler Räume verbunden sind. In dem vom Freistaat Sachsen geförderten Projekt 'Smart Utilities and Infrastructure Change' (SUSIC) war es daher das Ziel, durch eine Verknüpfung von fortschrittlichen IT-Verfahren und innovativen Ansätzen aus der Infrastrukturforschung ein Instrumentarium in Form eines digitalen Experimentierlabors zu konzipieren und zu implementieren. In thematischer Hinsicht ermöglichte das Projekt somit die Bewertung integrierter kommunaler und regionaler Infrastruktursysteme zur Bereitstellung von Energie und Wasser sowie zur Entsorgung von Abwasser, die von Akteuren betrieben und im Zeitverlauf durch Investitions- und Rückbauentscheidungen verändert werden. Hierbei kommt es typischerweise zu einer Interaktion zwischen zentralen Akteuren (z. B. Versorgungsunternehmen) und einer Vielzahl von dezentralen Akteuren (z. B. Haushaltseinkunden), die die Infrastrukturdienstleistungen nachfragen (z. B. als Haushaltsanwender) und auch zunehmend mitgestalten (z. B. als Prosumenten). Die Begrifflichkeiten 'Energy Transition' und 'Integrated Energy Systems' stellen auch mit die relevantesten Schlüsselwörter in Publikationen zur Energiesystemanalyse dar, was die Wichtigkeit der Thematik unterstreicht.⁴

⁴Vgl. Dominković u. a., 2022

Hinsichtlich der technischen Umsetzung von Verhaltensdynamiken und Lebensstilaspekten eignet sich hierfür das Konzept der agentenbasierten Softwareentwicklung.⁵ Multi-Agenten-Systeme repräsentieren Zusammenstellungen individueller Entitäten oder Gruppen von individuellen Entitäten, welche als Agenten bezeichnet werden.⁶ Agenten stellen heterogene Entscheidungsträger dar, die das urbane System durch ihre Entscheidungen oder ihre Verhaltensweisen (mit)gestalten. Neben der Heterogenität der Akteure bzw. der Investitionsentscheider können auch die technischen Restriktionen erfasst werden, die sich aus der vorhandenen Infrastruktur ergeben. Damit erlauben es agentenbasierte Systemmodelle, die Rahmenbedingungen, die durch die Liberalisierung der Energiemärkte, durch die Klimapolitik und durch die zunehmende Attraktivität dezentraler Technologien geschaffen wurden, in angemessener Art und Weise zu berücksichtigen.⁷ Hinter der Bewertung der möglichen Entwicklungen steht hierbei das Ziel, die relevanten Entscheidungsstrukturen im Hinblick auf die zukünftig steigenden Anforderungen weiterzuentwickeln. Aus praktischer Sicht zielte das Vorhaben darauf ab, einen konkreten Beitrag zur Entwicklung (im Sinne von „Design“ und „Management“) urbaner und regionaler Transformationsprozesse zu leisten, indem es den Einsatz der im Rahmen des Projekts erstellten computerbasierten Instrumente zur Unterstützung von Transformationsprozessen erprobte.

Wie die Ergebnisse der durchgeführten Literaturanalyse zeigen, erfahren Agentenbasierte Modelle eine immer breitere Anwendung in der Forschung und Praxis.⁸ Die Popularität liegt nicht zuletzt an der möglichen Flexibilität, mit welcher sich die komplexen Verhaltensweisen individueller Akteure auf der Mikro-Ebene abbilden lassen. Das Gleiche gilt ebenso für die Modellierung und Instantiierung der Interaktion zwischen heterogenen Akteuren. Die Darstellung dieser Interaktionen auf der Mikro-Ebene erlaubt es, die Dynamik des Verhaltens von Agenten und deren Auswirkungen auf der Makro-Ebene zu simulieren bzw. zu bestimmen. Daher werden Agentenmodelle verstärkt in der Modellierung von Verhaltensentscheidungen genutzt. Prosumentenentscheidungen hinsichtlich der Nachfrage nach Energie oder die Investition in nachhaltige bzw. umweltfreundliche Technologien können somit endogen simuliert werden. Aus diesem

⁵Vgl. Scheller, Wiese u. a., 2021

⁶Vgl. Wooldridge, 2009.

⁷Vgl. Wittmann und Bruckner, 2007.

⁸Vgl. Scheller, Johanning u. a., 2019.

Grund erfreuen sich die Modelle auch im Bereich der Innovationsdiffusion zunehmender Beliebtheit. Einen initialen Überblick über solche Modelle geben unter anderem Scheller et al. (2019), Hansen et al. (2019), Hesselink and Chappin (2019), Schulze et al. (2017), Rai and Henry (2016) und Kiesling et al. (2012). Aufgrund der politischen Relevanz lag der Fokus der Modelle in den letzten Jahren auch auf dem Endkundenverhalten und der Adoption (individuelle Investitionsentscheidung) bzw. Diffusion (gruppenbezogene Innovationsverbreitung) von umweltfreundlichen oder energieeffizienten Technologien. Zu den betrachteten Technologien gehören neben Elektro- bzw. Hybridautos auch Biokraftstoffe, Photovoltaikanlagen und Beleuchtungstechnik.⁹ Diesbezüglich haben viele Publikationen das Ziel, unterschiedliche Maßnahmen hinsichtlich der Verbreitung der umweltbewussten Technologien bzw. des umweltbewussten Verhaltens zu untersuchen. Dabei gilt es, mit Hilfe von Szenarien, das Akteursverhalten zu identifizieren sowie die Gruppendynamiken herauszustellen, die durch unterschiedliche energie- bzw. umweltpolitische Förderungen und Kampagnen aktiviert werden. Die skizzierte Thematik stellt nach einer Expertenbefragung auch einen wichtigen, aber auch schwierigen Modellierungsbaustein in der Energiesystemanalyse dar.¹⁰

Damit die Implikationen der Modellsimulationen unter Verwendung von verschiedenen Szenarien in der Wirklichkeit zur Anwendung kommen können, sollte das agentenbasierte Modell sowohl theoretisch als auch empirisch fundiert sein.¹¹ Während die theoretische Basis maßgebend für das Modelldesign ist, ist die empirische Basis ausschlaggebend für die Realitätsnähe. Ein wesentlicher Aspekt der Modellentwicklung ist die Darstellung der Entscheidungsfunktion und der Entscheidungsprozesse. Bei der Umsetzung reichen die eingesetzten Methoden von mathematischen Optimierungsmodellen über wirtschaftswissenschaftliche Modelle bis hin zu noch einfacheren Modellen auf Basis von Heuristiken. Notwendige sozialpsychologische Ansätze sollten dabei auf psychologischen Verhaltenstheorien basieren.¹² Eine Theorie, welche oft als Basis zur Entscheidungsmodellierung genutzt wird, ist die „Theorie des geplanten Verhaltens“¹³. Die genannte Theorie ist sinnvoll zur Beschreibung des Ad-

⁹Vgl. Scheller, Johanning u. a., 2019.

¹⁰Vgl. Scheller, Wiese u. a., 2021

¹¹Vgl. Scheller, Johanning u. a., 2019; H. Zhang und Vorobeychik, 2019.

¹²Vgl. Kiesling u. a., 2012.

¹³Vgl. Rai und Robinson, 2015; T. Zhang und Nuttall, 2011a.

optionsvorgangs von emissionsreduzierenden Haushaltstechnologien, da die Adoption ein Verbraucherverhalten darstellt, welches aus der Intentionentwicklung und dem eigentlichen Verhalten besteht. Diesbezüglich wurde demonstriert, dass die verhaltensspezifischen Konstrukte 'Einstellung', 'Subjektive Norm' und 'Verhaltenskontrolle' für beträchtliche Anteile der Varianz in der Ausprägung der Kategorien 'Absicht' und 'Verhalten' verantwortlich sind.¹⁴ Ein weiterer Aspekt der sozialen Modellierung von Agenten, der häufig eng mit Agentenheterogenität verbunden ist, ist die Modellierung der sozio-ökonomischen Eigenschaften von Agenten. Verschiedene Modelle gruppieren ihre Agenten mit Hilfe der Sinus-Milieus (Sinus Sociovision).¹⁵

Solche kognitiven Modelle verwenden oder erheben dabei oftmals auch andere Daten als Modelle, die sich rein auf wirtschaftliche Aspekte konzentrieren. Ein weiterer Kernbestandteil sind soziale Netzwerke, in welchen Agenten miteinander interagieren. Zur Modellierung greifen die Autoren gerne auf das Konzept der 'Sozialen Homophilie' zurück.¹⁶ Die Fundierung des Netzwerks und die Kommunikation zwischen den einzelnen Agenten spielt somit eine entscheidende Rolle (z. B. kommunizieren ähnliche Akteure vermehrt miteinander). Die Bedeutung der empirischen Fundierung für die Modellrobustheit wird von Wissenschaftlern vermehrt hervorgehoben, um detaillierte Fördermaßnahmen für einzelne Gesellschaftsgruppen zu erarbeiten.¹⁷ Hinsichtlich bestehender Arbeiten wird oftmals die methodische Beschreibung und auch die fehlende Verifikation und Validierung als nicht ausreichend gesehen.¹⁸ Potential wird dabei auch in der Integration von Agentensystemen und Optimierungsmodellen gesehen.¹⁹ Darüber hinaus werden oftmals Nutzenfunktionen in Agentenmodellen in Entscheidungsfunktionen verwendet, um über Annahme oder Ablehnung einer Innovation und somit über die Adoption zu entscheiden.²⁰ Dies geschieht, indem geprüft wird, ob ein Schwellenwert überschritten wird, oder Optionen anhand des errechneten Nutzens gegeneinander bewertet werden.

¹⁴Vgl. Ajzen, 1991.

¹⁵Vgl. Schwarz und Ernst, 2009.

¹⁶Vgl. Bravo u. a., 2013; Eppstein u. a., 2011.

¹⁷Vgl. Bonabeau, 2002.

¹⁸Vgl. Manzo, 2014.

¹⁹Vgl. Scheller, Johanning u. a., 2019.

²⁰Vgl. Palmer u. a., 2015; Rai und Robinson, 2015; Stummer u. a., 2015.

Aufgrund der Vielzahl von Aspekten, die in die Entscheidung des Akteurs einfließen, spielen eine Reihe weiterer Komponenten mit ihr zusammen. Dazu gehören beispielsweise der Verkaufskanal, die Massenmedien und die Werbung.²¹ In diesem Zusammenhang können auch andere Akteure (z. B. staatliche Behörden oder Unternehmen) auf die Entscheidung (oder zumindest auf die Wahrnehmung eines Akteurs) einwirken.²² Somit war es auch unser Anliegen, das Entscheidungsverhalten der kommunalen Unternehmen und der politischen Akteure zu verstehen, um mögliche politische Maßnahmen und unternehmerische Portfolioentscheidungen in das Modell zu integrieren. Auch wenn nur der Haushalt im Falle des vorliegenden Projekts als endogene Komponente im Agentenmodell implementiert wurde, wurden die regionalwirtschaftlichen Wertschöpfungseffekte sowie die energiepolitischen Ziele kommunaler Energieversorgungsunternehmen genauer untersucht. Diesbezüglich und im Rahmen der Adoptionsentscheidung durch die Konsumenten ist natürlich die gewählte Innovation oder die emissionsreduzierende Haushaltstechnologie mit seinen verschiedenen Ausprägungen und Eigenschaften entscheidend. Produktattribute sind vielfältig und reichen von technischen Parametern über ökologische Eigenschaften bis hin zu kostenbezogenen Parametern.²³ Aspekte, für die die stochastischen Modellierung verwendet wird, beziehen sich auf die Umgebung, Agentenzusammensetzung und Demographie, die Häufigkeit und Art der Kommunikation zwischen den Akteuren und das soziale Netzwerk.²⁴ Stochastische Intra-Agenten-Aspekte umfassen unter anderem die Präferenzschwollenwerte, die Wahl der Entscheidungsstrategie, bevölkerungsweite Schätzungen für Agenteneinstellungen bei der Initialisierung, Agentennutzen bei Modellfehlern und Preissensitivitäten sowie Gewichte für Auswahlkriterien und Gewichte für soziale und persönliche Zufriedenheit. Zu den Merkmalen sozialer Netzwerke, die stochastisch aufgebaut wurden, gehören die Auswahl von Freunden, um sozialen Einfluss zu simulieren, der Aufbau eines sozialen Netzwerks eines Agenten sowie die Lokalisierung von Agenten innerhalb des Netzwerks. Eine Zusammenfassung der in der Literatur verwendeten Modellentitäten und -dynamiken empirisch fundierter agentenbasierter Modelle ist in Abbildung 1.1 gegeben. Neben einigen Überlegungen zur Konsistenz und Vollständigkeit

²¹Vgl. Graebig u. a., 2014; Stummer u. a., 2015.

²²Vgl. Stummer u. a., 2015; T. Zhang und Nuttall, 2011b.

²³Vgl. Palmer u. a., 2015; Schwarz und Ernst, 2009; Stummer u. a., 2015.

²⁴Vgl. Eppstein u. a., 2011; Rai und Robinson, 2015; Stummer u. a., 2015.

bildeten sie die initiale Grundlage unseres zu erstellenden Akteursmodells.

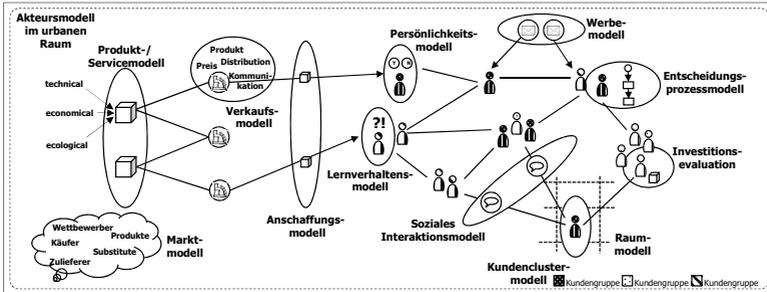


Abbildung 1.1.: Illustratives Zusammenspiel von Modellentitäten und -dynamiken in einem Akteursmodell zur Simulation von Investitions- bzw. Adoptionsentscheidungen von Endkunden. Quelle: Scheller, Johanning u. a., 2018.

Im Zentrum des von mehreren Fakultäten der Universität Leipzig in Kooperation mit dem Institut für Angewandte Informatik (InfAI) durchgeführten Digitalisierungsprojektes SUSIC stand somit die Konzipierung bzw. Modellierung und integrierte Bewertung kommunaler und regionaler Infrastruktursysteme zur Bereitstellung von Energie und Wasser sowie zur Entsorgung von Abwasser, die von heterogenen Akteuren betrieben und im Zeitverlauf durch Investitions- und Rückbauentscheidungen verändert werden. Hierbei kommt es, wie initial bereits eingeführt, zu einer Interaktion zwischen zentralen Akteuren und einer Vielzahl von dezentralen Akteuren, die die Infrastrukturdienstleistungen nachfragen und zunehmend auch selbst bereitstellen. Energie- und Wasserver- und -entsorger sind zentrale Akteure in Bezug auf die sichere und zunehmend umweltverträglichere Bereitstellung von Infrastrukturdienstleistungen. Erst wenn sichergestellt ist, dass sich die Investitionen zur Schaffung einer dekarbonisierten Energieversorgung und klimawandel-resilienten Wasserversorgung für diese zentralen Akteure im Kontext gegebener regulatorischer und demographischer Rahmenbedingungen „wirtschaftlich rechnen“, kann auf eine Realisierung der entsprechenden Transformation der Infrastruktursysteme gehofft werden. Eine Erweiterung der techno-ökonomischen Systemebene der bisher eingesetzten Planungsinstrumente durch eine

sozio-ökonomische Akteurebene, die das Verhalten dieser neuartigen Akteursgruppe adäquat abzubilden versucht, kann hier Abhilfe schaffen.²⁵ Als beispielhafte techno-ökonomische Systemebene wird in diesem Forschungsprojekt das existierende Infrastrukturoptimierungssystem IRPopt herangezogen.²⁶ Die Analysen von IRPopt umfassen auf kommunaler Ebene Geschäftsmodelle wie Nachbarschaftsspeicher, Eigenverbrauch, Direktverbrauch oder auch Direktvermarktung.²⁷ Die sozio-ökonomische Erweiterung sollte in diesem Forschungsprojekt durch die Erstellung der Akteurssimulationskomponente IRPact geschehen. Das gekoppelte Modell stellt einen innovativen Ansatz dar, mit dessen Hilfe die zukünftige Entwicklung urbaner Systeme analysiert werden kann. Hierbei wird die Heterogenität der energiewirtschaftlichen Akteure ebenso erfasst wie die sich aus der vorhandenen Infrastruktur ergebenden technischen Restriktionen. Eine Kopplung der Modelle erlaubt es somit, die Rückwirkung der Investitions- und Verhaltensentscheidungen der einzelnen Akteure auf die Performance des Energieversorgungssystems zu erfassen.²⁸ Die webbasierte Simulationsinfrastruktur IRPsim dient zur nutzerfreundlichen Anwendung der einzelnen und gekoppelten Modelle. Diesbezüglich verbirgt IRPsim die Komplexität des zugrundeliegenden Formalismus durch nutzerfreundliche Ein- und Ausgabeelemente. Weiterhin reduziert die Simulationsinfrastruktur den notwendigen Konfigurationsaufwand durch Mechanismen zur Wiederverwendung von Konfigurationswissen.²⁹

Die Zielerreichung von SUSIC erforderte den Einsatz von interdisziplinären Methoden, welche im Rahmen von 5 Teilprojekten ausgeführt wurden. Die erzielten Ergebnisse sind fachlicher (II. Fachliche Konzepte), softwaretechnischer (III. Softwaretechnische Umsetzung) und empirischer (IV. Empirische Untersuchungen) Natur. Sie werden in diesem Bericht entsprechend der genannten Struktur ausführlich beschrieben.

Als fachliche Anwendungsfälle der Akteurssimulation boten sich die Untersuchung der Adoption und Diffusion von Aufdach-Photovoltaikanlagen sowie grundstücksbezogenen Regenwasseranlagen an (Beitrag zu den Fallstudien). Auf dieser Basis wurden anschließend Entscheidungsprozesse

²⁵Vgl. Scheller, Johanning u. a., 2018.

²⁶Vgl. Scheller, Burgenmeister u. a., 2018.

²⁷Vgl. Scheller, Burkhardt u. a., 2020; Scheller, Krone u. a., 2018; Scheller, Reichelt u. a., 2017.

²⁸Vgl. Scheller, Johanning u. a., 2018.

²⁹Vgl. Kühne u. a., 2019.

se und das Entscheidungsverhalten von Endkunden und Unternehmen diskutiert (Beiträge für den Energiesektor und den Abwassersektor). Daneben wurden die kommunalen bzw. regionalwirtschaftlichen Zielsetzungen und Wertschöpfungseffekte dargelegt (Beiträge zur kommunalen Wertschöpfung und Steuerung kommunaler energiepolitischer Ziele). Bei der softwaretechnischen Umsetzung definierten wir zunächst die Architektur des Multi-Agenten-Modells zur Diffusion von Nachhaltigkeitsinnovationen (Beitrag zur agentenbasierten Modellierung). Das Modell wurde eingebettet in eine webbasierte Ausführungsstruktur, welche anschließend dargelegt wurde (Beitrag zur Ausführungsstruktur). Daneben entwickelten wir eine innovative Softwareumgebung, um die sozio-technische Modellkopplung zu ermöglichen (Beitrag zur Modellkopplung). Schlussendlich diskutierten wir die empirischen Ergebnisse der Umfragen, welche zur Parametrisierung des Modells nötig waren. Die berechneten Validierungs- und Simulationsergebnisse von IRPact und den Anwendungsfall Aufdach-Photovoltaik wurde daraufhin skizziert (Beitrag zur Modellkalibrierung und den empirischen Ergebnissen). Abschließend diskutierten wir ebenso ein Modellkonzept für den zweiten Anwendungsfall (Beitrag zur Empirik und Konzeptmodell im (Ab-)Wassersektor).

Danksagung

Dieser Beitrag wurde finanziert durch das Projekt „Smart Utilities and Sustainable Infrastructure Change“ (Antragsnummer 100378087 (SAB)).

Diese Maßnahme wird mitfinanziert durch Steuermittel auf der Grundlage des vom Sächsischen Landtag beschlossenen Haushaltes.



DOI: <https://doi.org/10.30819/5413.01>

Literatur

- Ajzen, I. (1991). »The Theory of Planned Behavior«. In: *Organizational Behavior and Human Decision Processes* 50, S. 179–211.
- Bonabeau, E. (2002). »Agent-based modeling: Methods and techniques for simulating human systems«. In: *Proceedings of the national academy of sciences* 99,suppl 3, S. 7280–7287.

- Bravo, G., E. Vallino, A. K. Cerutti und M. B. Pairotti (2013). »Alternative scenarios of green consumption in Italy: An empirically grounded model«. In: *Environmental modelling & software* 47, S. 225–234.
- Bundesministerium für Bildung und Forschung, Hrsg. (2015). *Zukunftsstadt. Strategische Forschungs-Und Innovationsagenda*.
- Dominković, D. F., J. M. Weinand, F. Scheller, M. D’Andrea und R. McKenna (2022). »Reviewing two decades of energy system analysis with bibliometrics«. In: *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 153, S. 111749. DOI: 10.1016/j.rser.2021.111749.
- Eppstein, M. J., D. K. Grover, J. S. Marshall und D. M. Rizzo (2011). »An agent-based model to study market penetration of plug-in hybrid electric vehicles«. In: *Energy Policy* 39.6, S. 3789–3802.
- Graebig, M., G. Erdmann und S. Röder, Hrsg. (2014). *Assessment of residential battery systems (RBS): profitability, perceived value proposition, and potential business models*.
- Hansen, P., X. Liu und G. M. Morrison (2019). »Agent-based modelling and socio-technical energy transitions: A systematic literature review«. In: *Energy Research & Social Science* 49, S. 41–52. ISSN: 2214-6296. DOI: 10.1016/j.erss.2018.10.021.
- Hesseling, L. X. und E. J. Chappin (2019). »Adoption of energy efficient technologies by households – Barriers, policies and agent-based modelling studies«. In: *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 99, S. 29–41. ISSN: 13640321. DOI: 10.1016/j.rser.2018.09.031.
- Kiesling, E., M. Günther, C. Stummer und L. M. Wakolbinger (2012). »Agent-based simulation of innovation diffusion: a review«. In: *Central Europ. Journal of Operations Research* 20.2, S. 183–230. DOI: 10.1007/s10100-011-0210-y.
- Kühne, S., F. Scheller, H. Kondziella, D. G. Reichelt und T. Bruckner (2019). »Decision support system for municipal energy utilities: Approach, architecture, and implementation«. In: *Chemical Engineering & Technology* 42.9, S. 1914–1922. DOI: 10.1002/ceat.201800665.
- Manzo, G. (2014). »Potentialities and limitations of agent-based simulations: an introduction«. In: *Revue française de sociologie* 55.4, S. 653–688.
- Palmer, J., G. Sorda und R. Madlener (2015). »Modeling the diffusion of residential photovoltaic systems in Italy: An agent-based simulation«. In: *Technological Forecasting and Social Change* 99, S. 106–131. ISSN: 00401625. DOI: 10.1016/j.techfore.2015.06.011.
- Rai, V. und A. D. Henry (2016). »Agent-based modelling of consumer energy choices«. In: *Nature Climate Change* 6.6, S. 556–562. DOI: 10.1038/nclimate2967.
- Rai, V. und S. A. Robinson (2015). »Agent-based modeling of energy technology adoption: Empirical integration of social, behavioral, economic, and environmental factors«. In: *Environmental Modelling & Software* 70, S. 163–177.
- Scheller, F., B. Burgenmeister, H. Kondziella, S. Kühne, D. G. Reichelt und T. Bruckner (2018). »Towards integrated multi-modal municipal energy systems: An actor-oriented optimization approach«. In: *Applied Energy* 228, S. 2009–2023. ISSN: 0306-2619. DOI: 10.1016/j.apenergy.2018.07.027. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0306261918310559>.
- Scheller, F., R. Burkhardt, R. Schwarzeit, R. McKenna und T. Bruckner (2020). »Competition between simultaneous demand-side flexibility options: the case of com-

- munity electricity storage systems«. In: *Applied Energy* 269, S. 114969. DOI: 10.1016/j.apenergy.2020.114969.
- Scheller, F., S. Johanning und T. Bruckner (2018). *IRPsim: A techno-socio-economic energy system model vision for business strategy assessment at municipal level*. Techn. Ber. Beiträge des Instituts für Infrastruktur und Ressourcenmanagement. URL: <http://hdl.handle.net/10419/183217>.
- Scheller, F., S. Johanning und T. Bruckner (2019). »A review of designing empirically grounded agent-based models of innovation diffusion: Development process, conceptual foundation and research agenda«. In: *Beiträge des Instituts für Infrastruktur und Ressourcenmanagement*.
- Scheller, F., J. Krone, S. Kühne und T. Bruckner (2018). »Provoking residential demand response through variable electricity tariffs—a model-based assessment for municipal energy utilities«. In: *Technology and Economics of Smart Grids and Sustainable Energy* 3.1, S. 1–20.
- Scheller, F., D. G. Reichelt, S. Dienst, S. Johanning, S. Reichardt und T. Bruckner (2017). »Effects of implementing decentralized business models at a neighborhood energy system level: A model based cross-sectoral analysis«. In: *2017 14th International Conference on the European Energy Market (EEM)*. IEEE, S. 1–6. DOI: 10.1109/EEM.2017.7981910.
- Scheller, F., F. Wiese, J. M. Weinand, D. F. Dominković und R. McKenna (2021). »An expert survey to assess the current status and future challenges of energy system analysis«. In: *Smart Energy* 4, S. 100057. DOI: 10.1016/j.segy.2021.100057.
- Schulze, J., B. Müller, J. Groeneveld und V. Grimm (2017). »Agent-based modelling of social-ecological systems: achievements, challenges, and a way forward«. In: *Journal of Artificial Societies and Social Simulation* 20.2. DOI: 10.18564/jasss.3423.
- Schwarz, N. und A. Ernst (2009). »Agent-based modeling of the diffusion of environmental innovations — An empirical approach«. In: *Technological Forecasting and Social Change* 76.4, S. 497–511. ISSN: 00401625. DOI: 10.1016/j.techfore.2008.03.024.
- Stummer, C., E. Kiesling, M. Günther und R. Vetschera (2015). »Innovation diffusion of repeat purchase products in a competitive market: An agent-based simulation approach«. In: *European Journal of Operational Research* 245.1, S. 157–167. ISSN: 0377-2217. DOI: 10.1016/j.ejor.2015.03.008.
- Wittmann, T. und T. Bruckner (2007). »Agentenbasierte modellierung urbaner energiesysteme«. In: *Wirtschaftsinformatik* 49.5, S. 352–360.
- Wooldridge, M. (2009). *An introduction to multiagent systems*. John Wiley & sons.
- Zhang, H. und Y. Vorobeychik (2019). »Empirically grounded agent-based models of innovation diffusion: a critical review«. In: *Artificial Intelligence Review* 52.1, S. 707–741. DOI: 10.1007/s10462-017-9577-z.
- Zhang, T. und W. J. Nuttall (2011a). »Evaluating government’s policies on promoting smart metering diffusion in retail electricity markets via agent-based simulation«. In: *Journal of Product Innovation Management* 28.2, S. 169–186.
- Zhang, T. und W. J. Nuttall (2011b). »Evaluating Government’s Policies on Promoting Smart Metering Diffusion in Retail Electricity Markets via Agent-Based Simulation*«. In: *Journal of Product Innovation Management* 28.2, S. 169–186. ISSN: 1540-5885. DOI: 10.1111/j.1540-5885.2011.00790.x.

Teil II.

Fachliche Konzepte

Beschreibung der realen Fallstudien als Forschungsobjekt für die modellbezogenen Analysen

Fabian Scheller¹, Emily Schulte², Simon Johanning², Stefan Geyler², Marie Moritz², Thomas Bruckner²

Highlights

- Die Modell- und Validierungsanforderungen im Projekt SUSIC basierten auf ausgewählten Fallstudien und historischen Diffusions- bzw. Adoptionsdaten in kommunalen Räumen.
- Zur Bestimmung der Systementitäten und -dynamiken wurde die Diffusion von Aufdach-Photovoltaikanlagen (PV) in der Stadt Leipzig (sowie der Stadt Dresden) analysiert und historisch aufbereitet.
- Auf der Ebene von Postleitzahlengebieten zeigte die PV-Adoptionsrate bei Privathaushalten eine positive Korrelation mit dem Anteil an 1-2 Familienhäusern und mit ausgewählten Sinus-Milieus[®] der Bewohner.
- Zur Konkretisierung der Anforderungen an ein Konzeptmodell zur grundstücksbezogenen Regenwasserbewirtschaftung wurde die Variabilität der Governancebedingungen in Leipzig und Berlin analysiert.

¹Department of Technology, Management and Economics, Technical University of Denmark

²Institut für Infrastruktur und Ressourcenmanagement, Universität Leipzig

Einleitung

Im Zuge des Klimawandels und der Klimaanpassung der Kommunen kommt Grundstückseigentümern eine steigende Bedeutung als Anbieter von Infrastrukturleistungen für das Gemeinwohl zu. Dies betrifft sowohl die Bereitstellung erneuerbarer Energien durch emissionsreduzierende Aufdach-Photovoltaikanlagen (PV) durch Ein- und Zweifamilienhausbesitzer als auch die Beiträge von Wohnungsunternehmen zur nachhaltigen Regenwasserbewirtschaftung. Diese Entwicklungen der vergangenen Jahre sowie die sie beeinflussenden Rahmenbedingungen und Faktoren sollten modellbezogen im SUSIC Projekt verstanden werden.

In diesem Zusammenhang stellen emissionsreduzierende Technologien wie z. B. PV innovative nachfrageseitige Technologien dar, die das Potenzial haben, die Nachhaltigkeit bzw. Treibhausgasemissionen von Wohnhäusern zu reduzieren.³ PV stellt eine Technologie dar, die ebenso eine mögliche Lösung für den Kompromiss zwischen der Befriedigung des steigenden Energiebedarfs und die gleichzeitige Reduzierung der Treibhausgasemissionen bieten kann.⁴ Ein Hauptanliegen der Politik stellt deren flächendeckende Verbreitung und damit die verbraucherseitige Adoption dar. In Deutschland variieren jedoch die Akzeptanzraten von PV für Privathaushalte stark zwischen Bundesländern, Regionen und Kommunen.⁵ Führende Bundesländer in Deutschland sind Bayern, Mecklenburg-Vorpommern, Sachsen-Anhalt und Baden-Württemberg. Diesbezüglich soll das Akteursmodell IRPact ein vertieftes empirisches und modellgetriebenes Verständnis über die Adoptionsentscheidungen der PV-Technologie durch unterschiedliche Haushalte geben.

Als räumlicher Untersuchungsrahmen wurde dabei die Kommune gewählt, da verschiedene Trends Kommunen eine entscheidende Rolle für eine erfolgreiche Energiewende zuschreiben. Erstens zeigen die traditionell passiven Konsumenten ein wachsendes Bewusstsein für Nachhaltigkeitsthemen und reklamieren Partizipation. Darüber hinaus erfordert die zunehmende Nutzung erneuerbarer Energieerzeuger durch Privathaushalte eine Neubewertung der bestehenden kommunalen Infrastruktur. Schlussendlich

³Vgl. Geels u. a., 2018; Metta u. a., 2020.

⁴Vgl. Metta u. a., 2020.

⁵Vgl. Dewald und Truffer, 2012.

wirken sich gesetzliche Regelungen und Maßnahmen direkt auf die Haushalte und kommunale Unternehmen aus. Dabei kann die Planung und Umsetzung zu erheblichen regionalwirtschaftlichen Effekten führen. Bei einer entsprechenden Beeinflussung der Adoption durch die kommunalen Träger bieten sich somit diverse Vorteile.⁶

Da auch das Regenwassermanagement moderner Kommunen unter starkem Veränderungsdruck steht, setzten wir im SUSIC Projekt auf einen zweigleisigen Ansatz hinsichtlich der Fallbeispiele. Dies ermöglichte auch eine stärkere Generalisierung unseres Modellierungsansatzes. Im Zuge des Klimawandels steigen die Risiken durch Starkniederschläge, Trockenheit und Überhitzung. Zugleich wachsen die politischen Anforderungen, z. B. im Gewässerschutz. In den attraktiven Ballungszentren werden diese Effekte durch Nachverdichtung noch verstärkt.⁷ Um diesen Herausforderungen zu begegnen, bietet sich die verstärkte Nutzung grundstücksbezogener Regenwasserbewirtschaftungsanlagen (gRWA), z. B. von Versickerungslösungen, Gründächern, Baumrigolen oder Ansätzen zur Regenwassernutzung an. Die Kommunen können hierbei das Adoptionsverhalten der Wohnungsunternehmen durch eine entsprechende Ausgestaltung der Governancebedingungen mit beeinflussen.

Die eingeführten Fallbeispiele stellten somit die empirische Referenz des SUSIC Projekts und des Akteursmodells IRPact dar. Ziel war einerseits die Ableitung und Beschreibung relevanter Akteure, Strukturen, Prozesse und Governancebedingungen sowie der zu betrachtenden technischen Gegebenheiten der Innovationen. Unter Berücksichtigung der modellierenden Problemstellung wurden außerdem die Diffusionsprozesse und Adoptionstreiber bzw. -barrieren herausgestellt. Andererseits dienten die historischen Diffusionsvorgänge und realen Adoptionsdaten in der Kommune Leipzig als Grundlage zur Demonstration der Funktionsfähigkeit des computergestützten Agentensystems sowie zur Validierung der empirisch erhobenen Akteursattribute und Systemdynamiken. In diesem Zusammenhang stellte, wie bereits kurz eingeführt, das Untersuchungsobjekt PV bei Privathaushalten den Fokus von IRPact dar. Zur Modularisierung und Generalisierung der Modellanforderungen wurde ebenso die Variabilität der Governancebedingungen in der Regenwasserbewirtschaftung betrachtet und in der Modellentwicklung berücksichtigt.

⁶Vgl. Weinszihr u. a., 2015.

⁷Vgl. Nickel u. a., 2014; Umweltbundesamt, 2019.

Diffusion von Aufdach-Photovoltaikanlagen bei Privathaushalten in Leipzig und Dresden

Für die realitätsnahe Bearbeitung der energiewirtschaftlichen Fragestellung referenzierten wir die Modellierung im SUSIC Projekt auf die Verbreitung von Aufdach-PV bei Privathaushalten. Die besondere Aufmerksamkeit des Modells liegt auf den Adressen mit 1-2 Familienhäusern, da Haushalte hier in der Regel selbst Eigentümer sind und Verfügungsgewalt über die Dachnutzung haben. Somit sind die Hausbewohner fähig, Investitionsentscheidungen im Hinblick auf PV-Aufdächanlagen zu treffen. Um die auftretenden Unterschiede in der Adoption von PV zwischen Regionen und Einwohnern zu erklären, gibt die vorhandene Literatur verschiedene Faktoren an, welche als Charakterisierung für eine hohe bzw. niedrige PV-Diffusion dienen können. Die herangezogenen Faktoren beschreiben unter anderem technische Gegebenheiten wie die Wirtschaftlichkeit der PV-Anlage unter den gegebenen Kosten und der Sonneneinstrahlung, haushaltsbezogene Eckpunkte wie Durchschnittseinkommen und Haushaltsgröße sowie räumliche Gegebenheiten wie Wohndichte und auch Gruppen- oder Peer-Effekte. Weiterhin wurden verschiedene abhängige Variablen verwendet: relative Maße wie die Verbreitungsrate oder der Prozentsatz der Ein- oder Zweifamilienhäuser mit Aufdach-PV und absolute Maße wie die Anzahl oder Kapazität von PV-Systemen. Bei genauerer Begutachtung der Analysen ist zu benennen, dass die Auswahl der unabhängigen Variablen sowie die Ergebnisse der Analysen stark von der ausgewählten Region und der räumlichen Granularität beeinflusst werden. Der Grund ist, dass die Studien aufgrund der Region aber auch aufgrund des Detaillevels auf unterschiedliche Variablen zurückgreifen.⁸ Zur besseren Parametrisierung führten wir somit eine eigene Analyse unter den festgelegten Modellgrenzen durch. Die Erkenntnisse der räumlichen Analyse verglichen und vervollständigten wir auch mit den Ergebnissen durchgeführter Fokusgruppen und Umfragen sowie Literaturanalysen.⁹

Im Einklang mit den genannten Untersuchungen wurde in diesem Projekt

⁸Vgl. Baginski und Weber, 2019; Bollinger und Gillingham, 2010; Dharshing, 2017; Müller und Rode, 2013; Rode und Müller, 2018; Thormeyer u. a., 2020.

⁹Vgl. Scheller, Doser, Schulte u. a., 2021; Scheller, Doser, Sloot u. a., 2020; Scheller, Graupner, Edwards, Johanning u. a., 2022; Scheller, Graupner, Edwards, Weinand u. a., 2022; Schulte, Scheller, Pasut u. a., 2022; Schulte, Scheller, Sloot u. a., 2022

ein empirisch und theoretisch fundierter Ansatz innerhalb der agentenbasierten Modellierung gewählt. Das auf Verhaltenstheorien basierende Modell wurde mit feingranularen sozio-geografischen Daten angereichert, um eine möglichst realitätsgetreue Abbildung der Modellkommune zu erhalten. Hierfür waren eine Vielzahl sozio-ökonomischer Mikrodaten, detaillierte Gebäudedaten zu Dachausrichtung und -neigung, Eigentümerklassifizierung und Daten zu bereits installierten Solaranlagen aus verschiedenen Datenquellen nötig. Für die Modellvalidierung und die spezifischen Untersuchungen in diesem Projekt wählten wir die Kommune Leipzig in Sachsen. Da die meisten Akteursmodelle aus der Literatur einen eher nationalen Ansatz wählten, erforderte unsere Auswahl hinsichtlich der Kommune einen höheren Modellierungs- und Detaillierungsgrad für die Akteure und die Dynamiken. Für die Modellkalibrierung, also den Modellierungsteil, der nicht direkt bestimmbare Parameter setzt, wurde ein Modellgegenstand gewählt, der der Kommune *Leipzig* möglichst ähnlich ist. Hierbei fiel die Wahl auf die ebenfalls in Sachsen gelegene Stadt *Dresden*, die in Bezug auf den Modellierungskontext große Ähnlichkeiten zu Leipzig aufweist (siehe Tabelle 2.1). Die Abbildung beider Kommune stellt sicher, dass die Simulation den modellierten Gegenstand so weit wie möglich entspricht und dass die Parameter auch wirklich die Realität abbilden und nicht nur auf die gewählte Fallstudie angepasst wurden (siehe Beitrag zur Modellkalibrierung und den empirischen Ergebnissen).

Zunächst wurde der Diffusionsprozess für jede Stadt nachgebildet. Aus Datenschutzgründen sind Installationsdaten auf einer feineren Gliederungsebene in Deutschland nicht verfügbar. Wie in Tabelle 2.1 aufgeführt, hatten im Jahr 2020 in Dresden und Leipzig jeweils 1.405 bzw. 2.132 natürliche Personen eine PV-Anlagen adoptiert. Zusätzlich wurde für die Fallstudien ein Datensätze zu der Kaufkraft auf Adressebene erworben. Der Datensatz enthält Adressen sowie die adressenspezifische Anzahl der Haushalte, dominante Sinus-Milieus[®] und Haushaltseinkommen. Diesbezüglich ist ersichtlich, dass die beiden Kommunen in vielen Aspekten sehr ähnlich sind und mit Dresden eine geeignete Fallstudie für die Kalibrierungsstudie ausgewählt wurde. Deutliche Unterschiede zeigen sich nur in der Intensität der Durchdringung von PV-Anlagen und dem mittleren Jahreseinkommen von Haushalten, die 1-2 Familienhäuser bewohnen. Die PV-Sättigung der potenziellen Nutzer (Haushalte in (Doppel-) Einfamilienhäusern) lag in Dresden und Leipzig unter dem Bundesdurchschnitt.

Tabelle 2.1.: Übersicht über die Adressen, Haushalte und Einkommen in den Kommunen Dresden und Leipzig

	Dresden	Leipzig
Anzahl PLZ-Gebiete	29	34
Anzahl Adressen	68.294	69.504
Anteil 1-2 Familienhäuser	49%	51%
Anzahl Haushalte	310.273	308.068
Anteil Haushalte in 1-2 Familienhäusern	20%	20%
Mittleres Jahreseinkommen	40.106 €	38.052 €
Mittleres Jahreseinkommen von Haushalten in 1-2 Familienhäusern	49.838 €	39.275 €
Mittleres Jahreseinkommen anderer Haushalte	38.233 €	37.572 €
PV-Diffusion 2020 (Anzahl Anlagen)	1.405	2.132

Die Milieuverteilung in den beiden Kommunen ist ebenso ähnlich. Starke Unterschiede zeigen sich jedoch zwischen den Bewohnenden von Doppel- oder Einfamilienhäusern. Während 44% dieser Haushalte in Dresden dem Milieu der 'Konservativ-Etablierten' zuzuordnen sind, macht dieses Milieu in Leipzig nur 13% der Bevölkerung aus. In der Kommune Dresden weisen 'Konservativ-Etablierte' das höchste Durchschnittseinkommen auf, während in Leipzig die Milieus 'Bürgerliche Mitte', 'Liberal-Intellektuelle' und 'Performer' besser abschneiden. In beiden Kommunen sind dagegen die Einkommen bei den Milieus 'Liberal-Intellektuelle' und 'Performer' am höchsten, wenn diese in (Doppel-) Einfamilienhäusern leben.

Charakterisierung der Diffusion von PV-Aufdachanlagen in den Kommunen Leipzig und Dresden

Die Anzahl installierter Anlagen wurde mittels des *Marktstammdatenregisters*¹⁰, einem zentralen Register von Strom- und Gaserzeugungsanlagen, aufgearbeitet. Hierzu wurden nur PV-Anlagen natürlicher Personen vor

¹⁰Siehe <https://www.marktstammdatenregister.de/MaStR>.

dem 01.01.2021 in den Modellkommunen¹¹ berücksichtigt. Diese Daten umfassten die in der Tabelle 2.1 genannten 1.405 bzw. 2.132 Anlagen, deren Verlauf in Abbildung 2.1 dargestellt ist.

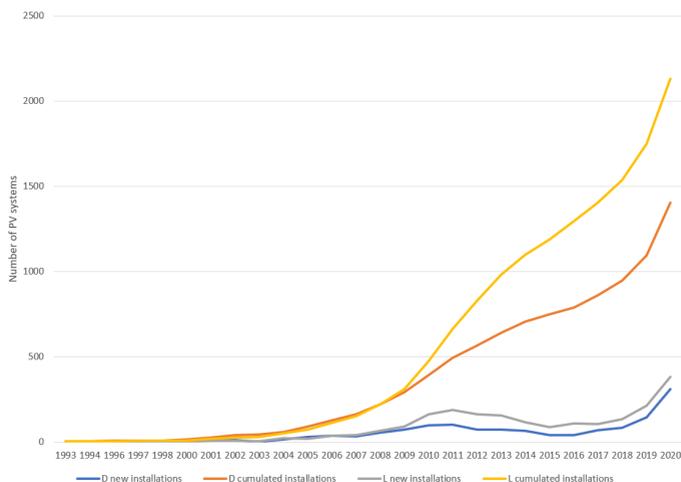


Abbildung 2.1.: Jährliche Installationen privater PV-Aufdachsysteme in den Modellkommunen Dresden (D) und Leipzig (L). Eigene Darstellung.

Eine Korrelationsanalyse der Adoptionsraten im Jahr 2020 auf Postleitzahlenebene zeigt, dass die absolute Verbreitung positiv mit der Anzahl der Adressen von Ein- bis Zweifamilienhäuser korreliert ist. Dies wird auch durch die positive Korrelation mit der relativen Anzahl von 1-2 Familienhäuser gestützt. Daneben deutet die Korrelation zwischen der PV-Sättigung und dem Anteil von Ein- bis Zweifamilienhäusern innerhalb eines Postleitzahlengebiets darauf hin, dass der Anteil potenzieller Adoptierer über das Postleitzahlengebiet hinweg von Bedeutung ist. So scheint ein größerer Anteil potenzieller Haushalte eine PV-Anlage zu installieren, wenn die Siedlungsstruktur von 1-2 Familienhäusern dominiert wird. Dagegen korreliert die Höhe des Einkommens auf Postleitzahlenebene nicht mit der Adoptionsrate.

¹¹Mit Ausschluss der Kommunen Radebeul, Radeberg, Pirna, Moritzburg und Freital, die mit dem Gemeindegeschlüssel Dresdens gelistet wurden.

Saturation of private PV systems in Leipzig, Germany 

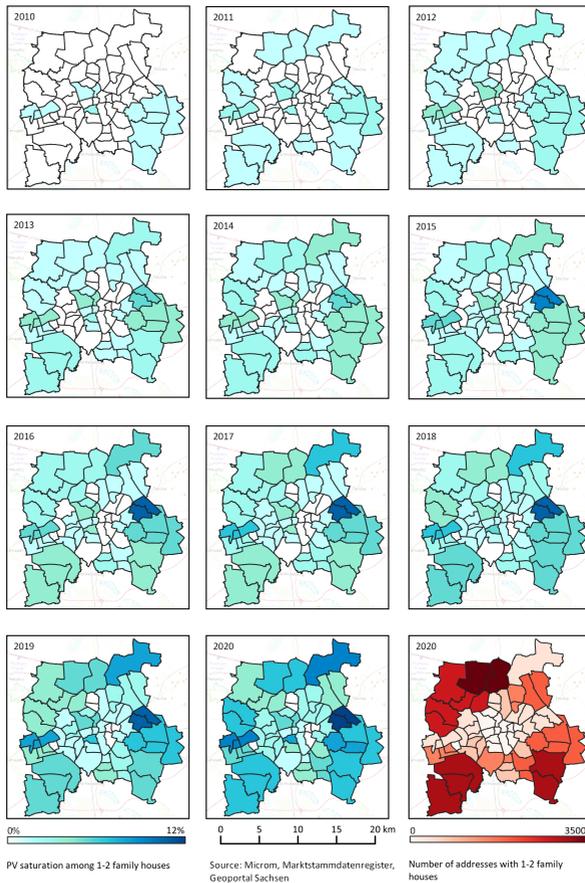


Abbildung 2.2.: Verbreitung von PV Aufdachanlagen Leipzig, zwischen den Jahren 2010 und 2020 nach PLZ (relativ). Eigene Darstellung.

Die zum Teil starke Differenzierung hinsichtlich der Installation von PV-Anlagen innerhalb der Modellkommunen ist beispielhaft für Leipzig in

Abbildung 2.3 dargelegt. Die Visualisierung innerhalb der Postleitzahlengebieten von Leipzig zwischen 2010 und 2020 zeigt, dass Postleitzahlen mit hohen Verbreitungszahlen typischerweise am Stadtrand liegen. Dies ist plausibel, da die Innenstadt im Gegensatz zum Stadtrand weniger 1-2 Familienhäuser aufweist. Ein ähnliches Muster ist für Dresden zu beobachten. Des Weiteren fasst die Abbildung 2.2 die Erkenntnisse zu PV-Sättigung, Einkommen und Wohnstruktur für Leipzig zusammen.

Daneben zeigen die mittleren und starken Korrelationen zwischen den Sinus-Milieus[®] der Bewohner und der PV-Sättigung die Wichtigkeit des Einbezugs der Lebensstile auf. Auf Postleitzahlenebene ist die Diffusion von PV positiv mit den Mitgliedern der Milieus 'Bürgerliche Mitte', 'Sozialökologische' und 'Liberal-Intellektuelle' assoziiert.

Aufbereitung der Mikrodaten

Für die empirisch verankerte Modellierung wurden für die beiden Modellkommunen unterschiedlich granulare sozio-geografischen Daten aufbereitet, um die Entitäten und die Zusammenhänge abzubilden. Dieses betrifft georeferenzierte Daten¹², Eigentümergeometrien, Anzahl der Haushalte an der Adresse, Milieuzusammensetzung an der Adresse, Dachorientierung und -neigung, sowie Gebäudekoordinaten. Diese wurden aus fünf Datenquellen extrahiert und miteinander verschnitten:

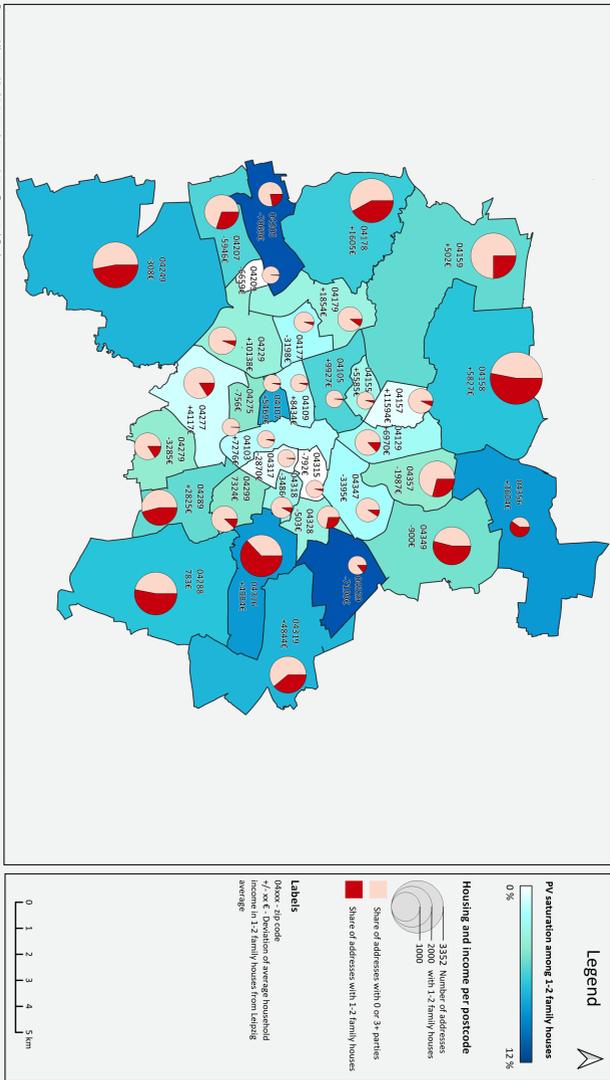
- Gebäudelayerdaten¹³ der Stadt Leipzig,
- INSPIRE¹³ Datensatz der Europäischen Kommission,
- LoD2¹³ 3D Gebäudedatensatz des Bundesamts für Kartografie und Geodäsie,
- Flurstückdatensatz¹³ der Stadt Leipzig sowie
- Microm¹⁴ Sozio-Milieu Datensatz (vom Forschungsteam erworben).

¹²Adressen als geo-referenzierte Punkte, Gebäude als geo-referenzierte Polygone und Gebäudeinformationen als Attribute geo-referenzierter Polygone.

¹³ mit adressspezifischer Granularität aus dem adress-spezifischen Datensatz Infrastructure for SPatial InfoRmation in Europe (Inspire), offener Geodaten des Landes Sachsen (3D-Gebäude layer mit *level of detail 2* (LoD2)) adressspezifischen Gebäude-Layer Daten, sowie eigentümerspezifische Daten auf Flurstück-Ebene der Stadt Leipzig.

¹⁴Erhalten von MB Micromarketing mit adressen-spezifischer Granularität für Leipzig und strassenabschnitts-spezifischer Granularität für Dresden.

PV saturation, housing and income in Leipzig, Germany (2020)



Source: Microm, Marktstammdatenregister, Geoportal Sachsen

Abbildung 2.3: Wohnstruktur, Einkommensverteilung und PV-Adoptionen für das Jahr 2020 in den PLZ-Gebieten Leipzig (absolut). Eigene Darstellung.

Aus diesen Daten konnte ein Datensatz vollständiger Daten für Leipzig mit 47.731 Einträgen (69,64% aller Adressen) erstellt werden, der für das Modell verwendet wird. Für Dresden standen nur der LoD2, INSPIRE und Microm Datensatz zur Verfügung. Damit konnten 48.165 vollständige Einträge (72,44%) erstellt werden. Für die Umsetzung des Modells wurden aus diesen Quellen gebäudescharfe Daten mit folgenden Attributen zusammengestellt:

1. ID
2. Adresse (Strasse, Hausnummer, PLZ)
3. Gebäudepolygon
4. Eigentübertyp (1=privat, 0=andere)
5. Haushaltsstruktur¹⁵
6. Einkommen
7. Dominantes Milieu
8. Dachorientierung und -Neigung
9. x- und y-Koordinaten des Gebäudes¹⁶

Anhand der Fallstudie Dresden stellt Tabelle 2.2 dar, welche dieser Datenpunkte aus welcher der oben genannten Quellen stammt.

Tabelle 2.2.: Daten und deren Überlappung (insgesamt und prozentual) der für die Kalibrierung anhand der Fallstudie Dresden verwendeten Daten. Die Bezifferung in den rechten Spalten bezieht sich auf die obige Auflistung.

Datenquelle	Größe	Überlappung		2	3	4	5	6	7	8	9
		Total	%								
LoD2	141,772	141,772	100%		x					x	x
Inspire	72,428	51,395	36%	x							x
Microm	68,294	49,657	35%	x			x	x	x		

Zur Instanziierung von IRPact im Rahmen der Nachbildung des Fallbeispiels PV-Adoption wurde einerseits auf die bereits skizzierten Datensätze zurückgegriffen. Andererseits wurden weitere nötige Daten für die Kommune Leipzig ermittelt, welche in der Geoinformationssoftware QGIS verwendet werden konnten. Über die Online-Datenbank Infrastructure for Spatial Information in the European Community (INSPIRE)¹⁷ konnte ein

¹⁵Klassifizierung danach, ob es sich um 1 oder 2 Haushalte, mehr als 2 Haushalte oder ein nicht wohnlich genutztes Gebäude handelt.

¹⁶Mittels der koordinatenbasierten Verortung des *Zentroiden*.

¹⁷Siehe <https://www.geoportal.nrw/inspire>.

georeferenzierter Datensatz mit Adresspunkten heruntergeladen werden. Das Land Sachsen stellt georeferenzierte 3-D-Stadtmodelle in unterschiedlicher Detailtiefe zur Verfügung¹⁸, von denen das Level of Detail 2 (LoD2) Modell über Grundrisse und Dachinformationen verfügt. Weiterhin stellte die Stadt Leipzig den Projektpartnern einen Datensatz zur Verfügung, aus dem die Eigentübertypen von Gebäuden abgeleitet werden konnten. Abbildung 2.4 stellt vergleichend die Datensatzgröße des Microm Datensatzes und des fertigen Modelldatensatzes dar, in dem die Microm Daten mit dem georeferenzierten Datensatz verschnitten wurden.

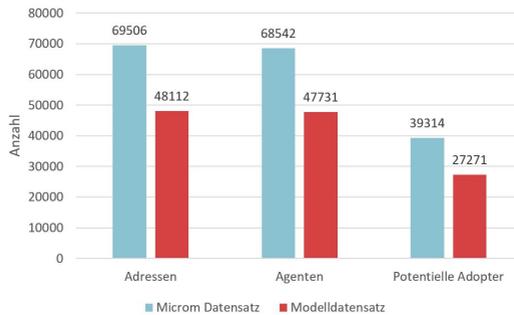


Abbildung 2.4.: Vergleichende Darstellung der Anzahl von Adressen in Leipzig, der Anzahl der davon als Wohnraum genutzten Adressen (Agenten), und der Adressen mit 1-2 Familienhäusern, die als potentielle Adopter im Modell eine zentrale Rolle spielen. Verglichen wird der gesamte Datensatz von Microm mit dem Modelldatensatz, der mit den georeferenzierten Daten verschnitten wurde. Eigene Darstellung.

Im Rahmen der Initialisierung können nun im Modell jedem Agenten in Abhängigkeit des Milieus weitere Eigenschaften zugeordnet werden.

¹⁸Siehe <https://www.geodaten.sachsen.de/downloadbereich-digitale-3d-stadtmodelle-4875.html>.

Variabilität der Rahmenbedingungen für die Nutzung von grundstücksbezogenen Regenwasserbewirtschaftungsanlagen durch Wohnungsunternehmen

In Bezug auf die nachhaltige Regenwasserbewirtschaftung nehmen Wohnungsunternehmen (WU) eine Schlüsselrolle ein, da sich ein großer Teil der Wohnungen und nicht-öffentlichen urbanen Flächen in ihrem Besitz befinden und die WU die größte geschlossene Gruppe von Anbietern am Wohnungsmarkt darstellen.¹⁹ Anders als Private verfügen WU über mehr personelle und finanzielle Ressourcen, um die Immobilien und etwaige Mietverhältnisse zu verwalten. Diese Kapazitäten erleichtern auch Innovationen. Zudem agieren WU vergleichsweise rationaler und werden in ihren Entscheidungen weniger von subjektiven Bedürfnissen beeinflusst.²⁰ Für die gesamtstädtische Transformation der Regenwasserbewirtschaftung spielt es eine Rolle, ob und welche grundstücksbezogenen Regenwasserbewirtschaftungsanlagen (gRWA) durch die WU aufgegriffen werden. Die WU können z. B. zwischen Versickerungslösungen, Gründächern, Baumrigolen oder Ansätzen zur Regenwassernutzung wählen oder diese kombinieren. Alle Anlagen haben gemeinsam, dass sie das Regenwasser am Ort des Auftretens zurückhalten und so die öffentliche Kanalisation entlasten und zum Überflutungs- und Gewässerschutz beitragen. Hinsichtlich ihrer Zusatznutzen unterscheiden sie sich jedoch deutlich. Während die Grundwasserneubildung durch lokale Versickerung gefördert wird (z. B. Mulden-Rigolen), erhöhen Gründächer die Verdunstung. Zugleich verbessern die Anlagen die Lebensqualität in den Quartieren und die Biodiversität.²¹ Technologie und Dimensionierung können den örtlichen Gegebenheiten und institutionellen Vorgaben angepasst werden. Dies ermöglicht eine kombinierte Nutzung von Anlagen und somit, Grundstücke teilweise oder vollständig vom zentralen System abzukoppeln.²²

¹⁹Vgl. Hain, 2009; Statistisches Bundesamt, 2015.

²⁰Vgl. Stengel, 2014; Weiß u. a., 2018.

²¹Vgl. Baumüller und Ahmadi, 2016; Hamburger Stadtentwässerung AöR und Stadt Hamburg, Behörde für Umwelt und Energie, 2015; Matzinger u. a., 2017; Nickel u. a., 2014.

²²Vgl. Geyler u. a., 2019; Stemplewski u. a., 2010; van Afferden u. a., im Erscheinen.

Inter- und intrakommunale Unterschiede bei Rahmenbedingungen

Für eine koordinierte Weiterentwicklung der Niederschlagsbewirtschaftung ist es wichtig, das räumlich-zeitliche Nutzungsverhalten der WU zu verstehen. In welchen Teilräumen greifen WU vergleichsweise schnell gRWA auf, welche Ansätze, d. h. Versickerung oder/und Gründach, werden gewählt und werden die Grundstücke dabei vollständig oder teilweise vom Kanal abgekoppelt? Um diese Fragen zu beantworten, müssen die Wechselwirkungen zwischen den zahlreichen rahmensetzenden Steuerungssignalen, weiteren naturräumlichen und strukturellen Einflüssen und dem Nutzungsverhalten der WU verstanden werden. Die folgenden Beispiele zeigen jedoch, dass diese Aspekte zwischen den Kommunen, aber auch innerhalb einer Kommune deutlich variieren können. So haben WU in ostdeutschen Städten einen relativ höheren Wohnungsbestand (ca. 50 %) als in westdeutschen (<30 %).²³ Zugleich sind in ostdeutschen Städten innerhalb der WU die Wohnungsgenossenschaften vergleichsweise wichtiger und der Anteil an privatwirtschaftlichen WU niedriger (vgl. Abbildung 2.5).

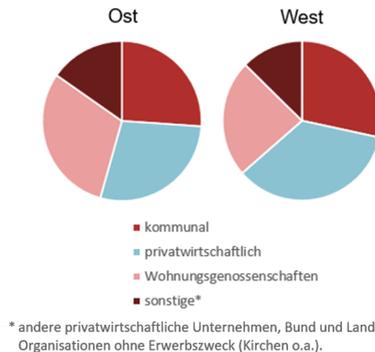


Abbildung 2.5.: Verteilung der Wohnungsunternehmen in den Stadtkreisen gegliedert nach Eigentumsform in Ost- und Westdeutschland. Eigene Darstellung nach Statistisches Bundesamt, 2015.

²³Vgl. Statistisches Bundesamt, 2015.

Weiterhin haben die Kommunen ihren Governance-Gestaltungsspielraum in sehr unterschiedlichem Maße genutzt, um mittels ordnungsrechtlicher, finanzieller und informatorischer Ansätze die Wohnungsunternehmen zu beeinflussen. Tabelle 2.3 illustriert dies für Berlin und Leipzig anhand beispielhafter Aspekte.

Tabelle 2.3.: Übersicht der unterschiedlichen Gestaltung der Governancebedingungen für gRWA in Berlin und Leipzig. Eigener Entwurf.

Governance	Berlin	Leipzig
Regenwasserentgelt	1,80 €/m ² a	0,94 €/m ² a
Entgeltreduzierung für gRWA mit Notüberlauf an Kanal	Gründach 50%, Versickerungsanlage 50%	Gründach 50 %
Einleitbegrenzung in den Kanal	Über Wassergesetz, Rechtsverordnung und Hinweisblätter des Senats geregelt	unter Bezug auf gesetzliche Aufhebung des AuBZ für RW
Kommunale Kommunikation	Berliner Regenwasseragentur – breite Vernetzung öffentlicher und privater Akteure	KAWI-L – Vernetzung der Fachbereiche und Informationsangebote an private Akteure
Kommunale Förderprogramme (FRL)*	Gründach-FRL sowie 3 weitere FRL (spezifische Berechtigte; städt. Teilräume; technologieunabhängig; Forschung)	Gründach-FRL

Stand 2021; AuBZ – Anschluss- und Benutzungszwang; * zusätzlich zu bundesweiten KfW-Programmen.

Beide Kommunen unterscheiden sich hinsichtlich Komplexität und Explizitheit der rechtlichen Verankerung von Ver- und Geboten (Beispiel Einleitbegrenzung) sowie finanzieller Anreize (Entgelthöhe, Reduktionsatbestände, Anzahl Fördermittel-Programme). Berlin hat zudem mit der Regenwasseragentur einen Kommunikationsakteur für die aktive Vernetzung von öffentlichen und privaten Akteuren, während Leipzig sich mit KAWI-L²⁴ innerhalb der Kommunalverwaltung vernetzt und bzgl. der privaten Grundstückseigentümer auf Informationsbereitstellung setzt. Um

²⁴Siehe <https://www.1.de/wasserwerke/hauseigentuemmer-bauherren/starkregen/ka-wi-1>.

für Wohnungsunternehmen die verschiedenen Einflüsse bzgl. Geschwindigkeit der Nutzung von gRWA und Technologiewahl zu verstehen, wird im Rahmen dieses Projektes das Entscheidungsverhalten konzeptionell betrachtet.

Danksagung

Dieser Beitrag wurde finanziert durch das Projekt „Smart Utilities and Sustainable Infrastructure Change“ (Antragsnummer 100378087 (SAB)).

Diese Maßnahme wird mitfinanziert durch Steuermittel auf der Grundlage des vom Sächsischen Landtag beschlossenen Haushaltes.



DOI: <https://doi.org/10.30819/5413.02>

Literatur

- Baginski, J. P. und C. Weber (2019). *Coherent estimations for residential photovoltaic uptake in Germany including spatial spillover effects: Working Paper*. URL: <http://hdl.handle.net/10419/201585>.
- Baumüller, J. und Y. Ahmadi (2016). *Beitrag von Regenwasserbewirtschaftungsmaßnahmen und freiraumplanerischen Gestaltungselementen zur Verbesserung des Stadtklimas: im Rahmen des Forschungsprojektes 'Stadt als hydrologisches System im Wandel. Schritte zu einem anpassungsfähigen Management des urbanen Wasserhaushalts'-(SAMUWA): SAMUWA Publikation*. URL: https://www.samuwa.de/img/pdfs/baumueller_ahmadi_2016_rwb_massnahmen_und_stadtklima.pdf.
- Bollinger, B. und K. Gillingham (2010). *Environmental Preferences and Peer Effects in the diffusion of solar PV*. Hrsg. von Unpublished Manuscript. URL: https://blog.zeit.de/gruenegeschaefte/files/2011/04/BollingerGillingham_PeerEffectsSolar.pdf.
- Dewald, U. und B. Truffer (2012). »The local sources of market formation: explaining regional growth differentials in German photovoltaic markets«. In: *European Planning Studies* 20.3, S. 397–420. DOI: 10.1080/09654313.2012.651803.
- Dharshing, S. (2017). »Household dynamics of technology adoption: A spatial econometric analysis of residential solar photovoltaic (PV) systems in Germany«. In: *Energy Research & Social Science* 23, S. 113–124. ISSN: 22146296. DOI: 10.1016/j.erss.2016.10.012.
- Geels, F. W., T. Schwanen, S. Sorrell, K. Jenkins und B. K. Sovacool (2018). »Reducing energy demand through low carbon innovation: A sociotechnical transitions perspective and thirteen research debates«. In: *Energy Research & Social Science* 40, S. 23–35. ISSN: 22146296. DOI: 10.1016/j.erss.2017.11.003.

- Geyler, S., N. Bedtke und E. Gawel (2019). »Sustainable Stormwater Management in Existing Settlements: Municipal Strategies and Current Governance Trends in Germany«. In: *Sustainability* 11.19, S. 1–23. DOI: 10.3390/su11195510.
- Hain, M. (2009). *Die Performance von öffentlichen Unternehmen am Beispiel von Wohnungsunternehmen in Deutschland*. Schriften zum europäischen Management. Wiesbaden: Gabler. DOI: 10.1007/978-3-8349-8792-1.
- Hamburger Stadtentwässerung AöR und Stadt Hamburg, Behörde für Umwelt und Energie, Hrsg. (2015). *RISA Strukturplan Regenwasser 2030: Ergebnisbericht des Projektes RISA - RegenInfraStrukturAnpassung*. Hamburg.
- Matzinger, A. u. a. (2017). *Zielorientierte Planung von Maßnahmen der Regenwasserbewirtschaftung: Ergebnisse des Projektes KURAS*. Berlin.
- Metta, J., Y. An, H. Zheng und L. Zhang (2020). »Potentials and opportunities towards the low carbon technologies – From literature review to new classification«. In: *Critical Reviews in Environmental Science and Technology* 50.10, S. 1013–1042. ISSN: 1064-3389. DOI: 10.1080/10643389.2019.1642834.
- Müller, S. und J. Rode (2013). »The adoption of photovoltaic systems in Wiesbaden, Germany«. In: *Economics of Innovation and New Technology* 22.5, S. 519–535. DOI: 10.1080/10438599.2013.804333.
- Nickel, D., W. Schoenfelder, D. Medearis, D. P. Dolowitz, M. Keeley und W. Shuster (2014). »German experience in managing stormwater with green infrastructure«. In: *Journal of Environmental Planning and Management* 57.3, S. 403–423. DOI: 10.1080/09640568.2012.748652.
- Rode, J. und S. Müller (2018). *What drives peer effects in household technology adoption - Evidence from solar photovoltaic systems*. Hrsg. von Unpublished Manuscript.
- Scheller, F., I. Doser, E. Schulte, S. Johanning, R. McKenna und T. Bruckner (2021). »Stakeholder dynamics in residential solar energy adoption: findings from focus group discussions in Germany«. In: *Energy Research & Social Science* 76, S. 102065. ISSN: 2214-6296. DOI: 10.1016/j.erss.2021.102065.
- Scheller, F., I. Doser, D. Sloot, R. McKenna und T. Bruckner (2020). »Exploring the role of stakeholder dynamics in residential photovoltaic adoption decisions: A synthesis of the literature«. In: *Energies* 13.23, S. 6283. DOI: 10.3390/en13236283.
- Scheller, F., S. Graupner, J. Edwards, S. Johanning, C. Bergaentzle und T. Bruckner (2022). »Social Influence Throughout the Photovoltaic Adoption Process: Exploring the Impact of Stakeholder Perceptions«. In: *Energy RESEARCH LETTERS* 3.Early View, S. 33903. DOI: 10.46557/001c.33903.
- Scheller, F., S. Graupner, J. Edwards, J. Weinand und T. Bruckner (2022). *Competent, trustworthy, and likeable? Exploring which peers influence photovoltaic adoption in Germany*. DOI: 10.1016/j.erss.2022.102755.
- Schulte, E., F. Scheller, W. Pasut und T. Bruckner (2022). »Product traits, decision-makers, and household low-carbon technology adoptions: moving beyond single empirical studies«. In: *Energy Research & Social Science* 83, S. 102313.
- Schulte, E., F. Scheller, D. Sloot und T. Bruckner (2022). »A meta-analysis of residential PV adoption: the important role of perceived benefits, intentions and antecedents in solar energy acceptance«. In: *Energy Research & Social Science* 84, S. 102339.

- Statistisches Bundesamt, Hrsg. (2015). *Gebäude- und Wohnungsbestand in Deutschland: Endgültige Ergebnisse*. URL: <https://www.statistikportal.de/de/veroeffentlichungen/zensus-2011-4>.
- Stemplewski, J., M. Becker und U. Raasch (2010). »Niederschlagswasser bewirtschaften statt beseitigen - ökologisch und wirtschaftlich sinnvoll«. In: *KA - Korrespondenz Abwasser, Abfall* 57.10, S. 1011–1019.
- Stengel, J. (2014). »Akteursbasierte Simulation der energetischen Modernisierung des Wohngebäudebestands in Deutschland«. Zugl.: Karlsruhe, KIT, Diss., 2014. Hannover und Karlsruhe. DOI: 10.5445/KSP/1000041854.
- Thormeyer, C., J.-P. Sasse und E. Trutnevyte (2020). »Spatially-explicit models should consider real-world diffusion of renewable electricity: Solar PV example in Switzerland«. In: *Renewable Energy* 145, S. 363–374. DOI: 10.1016/j.renene.2019.06.017.
- Umweltbundesamt, Hrsg. (2019). *Monitoringbericht 2019 zur Deutschen Anpassungsstrategie an den Klimawandel*. Dessau - Roßlau. URL: <https://www.klivportal.de/monitoringbericht2019>.
- van Afferden, M., G. Khurelbaatar und M. Ueberham (im Erscheinen). »Modellhafte Auswahl integrativer Regenwasser-Managementkonzepte«. In: *Wege zum abflussfreien Stadtquartier – Potentiale, Wirkungen und Rechtsrahmen des ortsnahen Schmutz- und Regenwassermanagements: FKZ 3716 15 333 0*. Hrsg. von Umweltbundesamt. Dessau - Roßlau, S. 36–61.
- Weinsziehr, T., M. Gröger, M. Verhoog und T. Bruckner (2015). »Multiple benefits as incentive for municipal climate mitigation efforts? The case of a German shrinking and aging middle size city«. In: *eccee Summer Study proceedings*, S. 487–497.
- Weiß, J., A. Bierwirth, J. Knoefel, S. März, J. Kaselofsky und J. Friege (2018). *Entscheidungskontexte bei der energetischen Sanierung: Ergebnisse aus dem Projekt Perspektiven der Bürgerbeteiligung an der Energiewende unter Berücksichtigung von Verteilungsfragen*. Berlin, Wuppertal. URL: <https://www.ioew.de/publikation/entscheidungskontexte>.

Modellierung von haushaltsseitigen Entscheidungsprozessen zur Adoption von Aufdach-Photovoltaik: Theorie und Umsetzung

Emily Schulte¹, Fabian Scheller², Simon Johanning¹

Highlights

- Für die Erstellung des Simulationsmodells PVact wird eine theoretisch und empirisch verankerte Logik für die Entscheidung von Haushalten für oder gegen die Installation einer Aufdach-Photovoltaikanlage entwickelt.
- Dazu wird der Literaturkörper zu Aufdach-Photovoltaik auf sein theoretisches Fundament und zentrale Einflussfaktoren untersucht.
- Nachdem Haushalte Bewusstsein über und Interesse an der Technologie erlangt haben, wird als nächster Prozessschritt eine Machbarkeitsprüfung durchgeführt, auf die bei positivem Ausgang eine Evaluierung mit anschließender Entscheidung folgt.
- Eine Aufdach-Photovoltaikanlage kann nur von Bewohnern von privaten 1-2 Familienhäusern adoptiert werden, die über ein ausreichendes Einkommen verfügen (Machbarkeit). Die individuelle Evaluierung berücksichtigt finanzielle, soziale und räumliche Überlegungen und das individuelle Umweltbewusstsein sowie die Innovativität.

¹Institut für Infrastruktur und Ressourcenmanagement, Universität Leipzig

²Department of Technology, Management and Economics, Technical University of Denmark

Einleitung

Die Energieinfrastruktur, einschließlich der Produktion, der Verteilung und des der Nutzung, wird zunehmend komplexer. Diese Entwicklung wird unter anderem dadurch angetrieben, dass sich die große Gruppe der privaten Verbraucher, der Haushalte, verändert. Ihr vormals relativ gut prognostizierbares Verhalten wird durch den Einsatz von Niedrigemissionstechnologien wie z.B. energieeffizienten Haushaltsgeräten, Wärmepumpen, Elektroautos und Photovoltaikanlagen diversifizierter.³ Mögliche neue Lastspitzen durch das Aufladen von Elektroautos und Wärmepumpen, Einspeisung von Überschussstrom von Photovoltaikanlagen, sinkender Verbrauch aufgrund des Einsatzes moderner Technologien, verschobene Lastspitzen oder die zunehmend autarke Stromversorgung von Haushalten mit Photovoltaikanlagen und Batterien erschweren die langfristige Planung der gemeinsamen Energieinfrastruktur. Zwar werden auch heute die Versorgungsunternehmen in ihren Entscheidungen durch techno-ökonomische Energiesystemmodelle unterstützt, jedoch scheinen im Lichte der Entwicklungen Modelle, die nur wirtschaftliche Faktoren und rationale Entscheidungen berücksichtigen, nicht mehr auszureichen.⁴ Um dezentrale Entwicklungen in einem Versorgungsgebiet in Planungen einbeziehen zu können ist es deshalb nötig, Investitionen von Haushalten bezüglich Niedrigemissionstechnologien räumlich und zeitlich explizit zu simulieren.⁵

Um die beschriebene Problemstellung zu adressieren, wurde im Rahmen des Projektes SUSIC das Modell PVact entwickelt, das die vielfältigen Einflüsse auf die Investitionsentscheidungen von heterogenen Haushalten auf der Mikroebene abbildet. In einem nächsten Schritt kann das aggregierte Verhalten auf der Makroebene abgeleitet und dessen Wechselwirkung mit techno-ökonomischen Entwicklungen untersucht werden. Aufgrund der großen Unterschiede zwischen Niedrigemissionstechnologien, sowohl was ihr Anwendungsgebiet, ihre Wirkung, Kosten und Innovativität betrifft, kann nicht davon ausgegangen werden, dass der Prozess hin zu einer Entscheidung bei allen Technologien gleich ausgeprägt ist. Um dieser Problematik zu begegnen, wurde die Aufdachphotovoltaikanlage als

³Vgl. IEA, 2022.

⁴Vgl. Kraan u. a., 2019; Li u. a., 2015.

⁵Z.B. Hesselink und Chappin, 2019; Niamir u. a., 2018.

Beispieltechnologie ausgewählt, anhand derer das Simulationsmodell entwickelt wurde.

Um das angestrebte Simulationsmodell zur Beschreibung der Investitionen von Privathaushalten in Aufdachphotovoltaikanlagen zu entwickeln, war es zunächst von zentraler Relevanz, die wichtigsten Einflussfaktoren auf die individuelle Investitionsentscheidung zu identifizieren. Danach mussten die Einflussfaktoren in einen Entscheidungsprozess, also einer Abfolge von Schritten hin zu einer möglichen Entscheidung, integriert werden. Dabei wurde einerseits bestehende empirische Literatur zur Adoption von Aufdachphotovoltaikanlagen hinzugezogen, andererseits wurden relevante Theorien in der Modellentwicklung berücksichtigt. Der Entscheidungsprozess musste zuletzt in eine für eine Agentensimulation handhabbare und verständliche Form gebracht werden.

Empirische Forschung und Entscheidungstheorien

Entscheidungstheorien im Kontext von privater PV-Adoption

Die ersten Studien über die Adoption von Photovoltaik(PV)-Anlagen in Privathaushalten wurden in den frühen 1980er Jahren durchgeführt.⁶ Dabei wurde die Diffusionsinnovationstheorie (DOI)⁷ zur Erklärung der Motive von frühen Adoptern angewandt. Seitdem ist ein umfangreicher Literaturkörper entstanden, der verschiedene konzeptionelle und methodische Ansätze verfolgt. Während einige Forscher die Entscheidung für oder gegen eine Photovoltaikanlage in einem theoretischen Vakuum analysieren,⁸ scheinen sich drei Verhaltenstheorien als theoretisches Fundament der Literatur etabliert zu haben: Die bereits genannte DOI, die Theorie des geplanten Verhaltens (TPB)⁹ und die Value-Belief-Norm Theory (VBN)^{10,11}

⁶z.B. Labay und Kinnear, 1981; Sawyer, 1982.

⁷Siehe Rogers, 2003.

⁸Vgl. Islam, 2014; Palm, 2018; Rai u. a., 2016.

⁹Siehe Ajzen, 1991, 2020.

¹⁰Siehe Stern, 2000.

¹¹Vgl. Alipour u. a., 2021; Wolske, Stern u. a., 2017.

Die DOI ist ein konzeptionelles Paradigma, welches verwendet wird, um zu verstehen, warum und wie Innovationen in einem sozialen System erfolgreich sind. Grundsätzlich wird angenommen, dass sich Innovationen über Kommunikationskanäle in einer Gesellschaft verbreiten, und dabei einer S-Kurve folgen. Wann und wie stark sich die Diffusion beschleunigt und wann Sättigung erreicht ist, hängt von der Innovation und dem sozialen System ab. In der DOI wird die Entscheidung für oder gegen eine Innovation in einem fünfstufigen Entscheidungsprozess (Wissen, Überzeugung, Entscheidung, Umsetzung, Bestätigung) abgebildet, der die komplexen inter- und intrapersonellen mentalen Prozesse rund um eine Entscheidung darstellen soll.¹² Der Prozess wurde bis heute wenig untersucht, da umfangreiche, wiederkehrende und damit schwer durchzuführende Studien in einem stabilen Umfeld notwendig wären, um seine Gültigkeit nachzuweisen.¹³ Stattdessen werden verschiedene Variablen aufgegriffen, die im Konzept der DOI auftauchen. Die Theorie legt nahe, dass die Geschwindigkeit der Diffusion einer Innovation nicht primär von ihren intrinsischen Eigenschaften abhängt, sondern davon, wie sie von potenziellen Adoptern wahrgenommen wird. Als relevant werden die Merkmale relativer Vorteil, Kompatibilität, Komplexität, Beobachtbarkeit und Erprobbarkeit genannt. Weiterhin hängt laut DOI der Zeitpunkt der Adoption eines Individuums innerhalb eines sozialen Netzwerks von individuellen Merkmalen ab, einschließlich soziodemografischer (z. B. Bildung, Einkommen) und psychografischer (z. B. Innovativität, Weltoffenheit) Maße, die zwischen den Erstanwendern, den so genannten Innovatoren, und den Nachzüglern, die die Innovation als Letzte annehmen, variieren. In einer Meta-Analyse zur Innovationsadoption konnte gezeigt werden, dass psychografische Merkmale wichtige Prädiktoren für Absichten und Verhalten sind, wohingegen soziodemografischen Merkmale keinen Einfluss zu haben scheinen.¹⁴

In VBN wird umweltfreundliches Verhalten durch individuelle Merkmale, die mit der Einstellung gegenüber der Umwelt zusammenhängen, vorausgesetzt.¹⁵ Dabei wird, ähnlich wie in der Anwendung von psychografischen und soziodemografischen Merkmalen in der DOI, kein Zusammenhang zwischen individuellen Merkmalen und der Einschätzung einer konkreten Verhaltensweise hergestellt. Stattdessen wird angenommen, dass Umwelt-

¹²Vgl. Rogers, 2003.

¹³Vgl. Ajzen, 1991; Rogers, 2003.

¹⁴Vgl. Arts u. a., 2011.

¹⁵Vgl. Stern, 2000.

bewusstsein (VBN) bzw. Innovativität (DOI) jedes umweltfreundliche bzw. innovative Verhalten direkt vorhersagen können. Diese Annahme ist jedoch schwer haltbar, denn es gibt keinen prototypischen grünen Verbraucher, und eine besonders innovative Person kann nicht gleichzeitig alle Innovationen annehmen.¹⁶

Während in der DOI fünf wahrgenommene Merkmale von Innovationen als zentral für deren Erfolg in einem sozialen System angenommen werden, bietet die TPB einen konkreteren analytischen Rahmen für das Verständnis des individuellen Verbraucherverhaltens.¹⁷ In TPB wird die individuelle Verhaltensabsicht durch die Konstrukte *Einstellung* gegenüber des Verhaltens, *subjektive Norm* und *wahrgenommene Verhaltenskontrolle* vorhergesagt. Verhaltensabsicht und Verhaltenskontrolle prognostizieren wiederum das Verhalten.¹⁸ Individuelle Merkmale (z.B. Alter, Bildung, Stimmung, Werte, Wissen) und soziale Faktoren (z.B. Religion, Kultur, Wirtschaft, Medien) werden als Hintergrundfaktoren beschrieben, die keinen direkten Effekt auf die Verhaltensabsicht oder das Verhalten haben, sondern die Bewertung der drei Konstrukte beeinflussen.¹⁹ Diese kausale Kette geht einher mit Aussagen von Arts und Wolske, die die Adoption von (umweltfreundlichen) Innovationen als einen zielgerichteten Prozess beschreiben, in dem Verhaltensweisen durch Individuen bewertet werden.²⁰

Einflussfaktoren auf die Adoption von PV-Anlagen

Aus den zahlreichen in der wissenschaftlichen Literatur untersuchten Einflussfaktoren für Haushaltsinvestitionen in Photovoltaikanlagen können vier relevante Themenbereiche abgeleitet werden.²¹

Finanzielle Überlegungen spielen eine zentrale Rolle bei der Entscheidung für oder gegen eine Photovoltaikanlage. Einerseits hängt deren Wirtschaftlichkeit von individuellen Gegebenheiten ab. Dazu gehört zunächst die generelle Entscheidungsgewalt eines Haushaltes über eine Dachfläche, die gegeben sein muss um eine Investition überhaupt in Betracht ziehen

¹⁶Vgl. Peattie, 2010.

¹⁷Vgl. Ajzen, 1991.

¹⁸Vgl. ebd.

¹⁹Vgl. Ajzen, 2020.

²⁰Vgl. Arts u. a., 2011; Wolske, Stern u. a., 2017.

²¹Vgl. Schulte, Scheller, Pasut u. a., 2022.

zu können. Die verfügbare solare Strahlungsmenge wird grundsätzlich durch die geographische Lage der Dachfläche bestimmt; weiterhin spielen die Dachneigung und -orientierung eine Rolle, da sie die Ausnutzung der verfügbaren Strahlungsmenge beeinflussen.²² Andererseits wird die Wirtschaftlichkeit durch techno-ökonomische und politische Rahmenbedingungen bestimmt, zu denen unter anderem Investitionskosten, Anlageneffizienz, die garantierte Einspeisevergütung, die steigenden Strompreise und der angenommene Zinsfuß zählen, die sich über die Zeit verändern. Ist eine Anlage rentabel, eignet sie sich als Investitionsobjekt. Verschiedene Studien konnten zeigen, dass Haushalte mit höheren Einkommen eher dazu tendieren, eine Photovoltaikanlage zu installieren, als Haushalte mit niedrigen Einkommen.²³

Auch dem Themenbereich der **sozialen Norm** kommt große Aufmerksamkeit in der PV Adoptionsforschung zuteil. So konnte gezeigt werden, dass der Eindruck, das eigene soziale Netzwerk würde eine Investition in eine Photovoltaikanlage gut finden, einen positiven Einfluss auf die Investition hat.²⁴ In der Literatur wird dabei oftmals zwischen aktiven und passiven Peereffekte unterschieden. Einerseits steht die PV-bezogene Kommunikation mit relevanten Stakeholdern positiv mit der Adoptionsentscheidung in Verbindung.²⁵ Die Art der Kommunikation, die Einschätzung des Gegenübers und auch der Fortschritt im Entscheidungsprozess spielen dabei hinsichtlich der Einflusswirkung eine Rolle.²⁶ Eine weitere Komponente des sozialen Einflusses ist der passive Peereffekt.²⁷ So konnte in Studien gezeigt werden, dass mehr Photovoltaikanlagen im räumlichen Umfeld mit einer erhöhten Adoptionswahrscheinlichkeit zusammenhängen, wodurch es zu Clusterbildungen kommt.²⁸ Insgesamt ist es jedoch schwierig, die Effekte einzugrenzen und kausale Erklärungen für beobachtbare Zusammenhänge zu finden.²⁹

Zahlreiche Studien untersuchen zudem die Zusammenhänge zwischen den persönlichen Merkmalen **Umwelteinstellungen** und **Innovativität** und

²²Vgl. Galvin, 2020.

²³Vgl. Jacksohn u. a., 2019.

²⁴Vgl. Aggarwal u. a., 2019; Petrovich u. a., 2019.

²⁵Vgl. Mundaca und Samahita, 2020; Scheller, Doser, Schulte u. a., 2021.

²⁶Vgl. Scheller, Doser, Sloot u. a., 2020; Scheller, Graupner u. a., 2022.

²⁷Vgl. Bollinger und K. Gillingham, 2010.

²⁸Vgl. Baginski und Weber, 2019; Rode und Müller, 2019.

²⁹Vgl. Wolske, K. T. Gillingham u. a., 2020.

der Kaufabsicht bzw. dem Kauf. In einer Meta-Analyse von Studien zur Investitionsabsicht in Photovoltaikanlagen konnte gezeigt werden, dass beide Konstrukte durch die Einstellung gegenüber der PV-Anlage indirekt auf die Kaufabsicht wirken.³⁰

Entscheidungsverhalten in PVact

Basierend auf den obenstehenden Ausführungen wird die Entscheidung eines Agenten für oder gegen eine PV-Anlage im Agentenmodell als Prozess mit sechs Zuständen abgebildet (Z1 - Z6) (siehe Abbildung 3.1). Agenten entsprechen den zu Wohnzwecken genutzten Adressen im zu untersuchenden Gebiet - somit ist jeder bewohnten Adresse im Untersuchungsgebiet ein Agent zugeordnet.

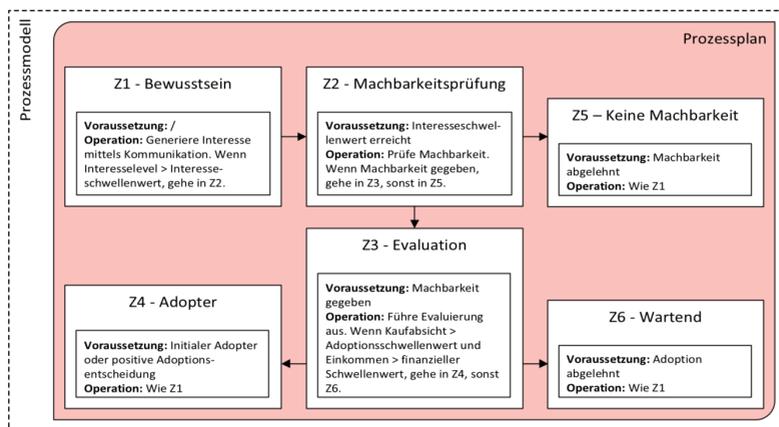


Abbildung 3.1.: Prozessplan für die Agenten in der Simulationssoftware PVact. Eigene Darstellung.

Der Prozess setzt am Bewusstsein über die Existenz von Aufdach-Photovoltaikanlagen (Z1) an. In Anlehnung an die DOI kommunizieren Agenten in diesem Zustand innerhalb ihres sozialen Netzwerkes und generieren

³⁰Vgl. Schulte, Scheller, Sloot u. a., 2022.

darüber Interesse an Photovoltaikanlagen.³¹ Je weiter die Kommunikationspartner im Entscheidungsprozess fortgeschritten sind, desto mehr Interessenpunkte erhält der andere Agent. Interessenpunkte addieren sich auf und bei Überschreiten des Interessenschwellenwertes gehen Agenten in den nächsten Zustand über. Mit Z₁ wird die Grundvorstellung der DOI, dass sich Innovationen mittels Kommunikation der klassischen S-Kurve folgend in einer Gesellschaft ausbreiten, integriert. Im zweiten Zustand (Z₂) prüfen Agenten, ob sie Entscheidungskompetenz in Bezug auf Photovoltaikanlagen haben. Entscheidungskompetenz ist gegeben, wenn sie in einem privaten Ein- oder Zweifamilienhaus leben. Agenten, die über keine Entscheidungskompetenz verfügen, verharren bis zum Ende der Simulation in Zustand 5 (Z₅), der dadurch gekennzeichnet ist, dass die Agenten sich genauso verhalten wie in der Bewusstseinsphase.³² Im dritten Zustand (Z₃) findet eine Produktevaluierung mit anschließender Entscheidung für oder gegen die Investition statt. Sie fasst also die Überzeugungs- und Entscheidungsphase aus der DOI zusammen. Zwei Komponenten fließen in die Entscheidung ein. Das Einkommen der Agenten stellt eine Verhaltenskontrolle dar - unterschreitet es einen finanziellen Schwellenwert, kann nicht adoptiert werden. Zudem wird das Produkt evaluiert, und das Evaluationsergebnis (Kaufabsicht) wird mit dem Adaptionsschwellenwert verglichen. Nur wenn beide Schwellenwerte überschritten werden, adoptieren Agenten und werden zu Adoptern (Z₄), ansonsten finden regelmäßige Re-Evaluationen statt (Z₆).³³ Die Evaluierung basiert auf der oben dargestellten TPB, die an den speziellen Anwendungsfall angepasst wurde.

Um die Kaufabsicht zu berechnen werden fünf gewichtete Komponenten herangezogen. Mithilfe der geographischen Lage, der Dachorientierung und -neigung des Agenten und den sich jährlich entwickelnden techno-ökonomischen Spezifikationen von PV-Anlagen wird die **finanzielle Komponente** berechnet. In dieser wird der agenten- und jahresspezifische Kapitalwert einer 1 kW_{peak} Anlage berechnet, in Relation zu

³¹Initiales Interesse ist normalverteilt und wird absteigend nach Innovativität zugeordnet.

³²Entscheidungskompetenz kann im Rahmen von Neubaumaßnahmen erlangt werden, wodurch Agenten Z₅ wieder verlassen können.

³³Re-Evaluationen folgen der gleichen Logik wie Evaluationen und finden zu Beginn, Mitte und Ende der Simulationsjahre statt. Dadurch werden jeweils Veränderungen des Agenten (Umweltbewusstsein, Innovativität, Neubau), seines räumlichen und sozialen Umfeldes (verändertes Netzwerk, neue (potentielle) Adopter) und der techno-ökonomischen Gegebenheiten (jährliche Aktualisierung der Rahmenbedingungen) eingebunden.

dem durchschnittlichen Kapitalwert über den Simulationshorizont gesetzt, und mithilfe einer logistischen Funktion auf eine Skala von 0 - 1 gebracht. Werte $>0,5$ sprechen für eine verhältnismäßig rentable, und Werte $<0,5$ für eine verhältnismäßig unrentable Anlage. Das **Umweltbewusstsein** und die **Innovativität** des Agenten gehen als zwei weitere Komponenten in die Berechnung ein.³⁴ Die soziale Norm wird über zwei Komponenten integriert. Im Rahmen des **räumlichen Druckes** wird die relative Durchdringung von PV-Anlagen in einem Radius von 2 km um den Agenten herum betrachtet. Eine Durchdringung von 1 ist gegeben, wenn alle potentiellen Adopter, also solche Agenten die über Entscheidungsgewalt und ausreichendes Einkommen verfügen, eine PV-Anlage adoptiert haben. Nach demselben Schema wird der **soziale Druck** berechnet, wobei hierbei die Durchdringung im sozialen Umfeld betrachtet wird.

Danksagung

Dieser Beitrag wurde finanziert durch das Projekt „Smart Utilities and Sustainable Infrastructure Change“ (Antragsnummer 100378087 (SAB)).

Diese Maßnahme wird mitfinanziert durch Steuermittel auf der Grundlage des vom Sächsischen Landtag beschlossenen Haushaltes.



DOI: <https://doi.org/10.30819/5413.03>

Literatur

- Aggarwal, A. K., A. A. Syed und S. Garg (2019). »Diffusion of residential RT solar – is lack of funds the real issue?« In: *International Journal of Energy Sector Management* 14.2, S. 316–334. ISSN: 1750-6220. DOI: 10.1108/IJESM-02-2019-0004.
- Ajzen, I. (1991). »The Theory of Planned Behavior«. In: *Organizational Behavior and Human Decision Processes* 50, S. 179–211.
- Ajzen, I. (2020). »The theory of planned behavior: Frequently asked questions«. In: *Human Behavior and Emerging Technologies* 2.4, S. 314–324. ISSN: 2578-1863. DOI: 10.1002/hbe2.195.

³⁴Das individuelle Umweltbewusstsein und die Innovativität verändern sich bei Kommunikationsevents entsprechend des Relative Agreement Algorithmus (Vgl. Chattoe-Brown, 2014; Defluant u. a., 2002). Zudem erhöht sich das Umweltbewusstsein der Agenten jährlich um einen festen Faktor, basierend auf Bauske und Kaiser, 2019.

- Alipour, M., H. Salim, R. A. Stewart und O. Sahin (2021). »Residential solar photovoltaic adoption behaviour: End-to-end review of theories, methods and approaches«. In: *Renewable Energy* 170, S. 471–486. ISSN: 09601481. DOI: 10.1016/j.renene.2021.01.128.
- Arts, J. W., R. T. Frambach und T. H. Bijmolt (2011). »Generalizations on consumer innovation adoption: A meta-analysis on drivers of intention and behavior«. In: *International Journal of Research in Marketing* 28.2, S. 134–144. ISSN: 01678116. DOI: 10.1016/j.ijresmar.2010.11.002.
- Baginski, J. P. und C. Weber (2019). *Coherent estimations for residential photovoltaic uptake in Germany including spatial spillover effects: Working Paper*. URL: <http://hdl.handle.net/10419/201585>.
- Bauske, E. und F. G. Kaiser (2019). *Umwelteinstellung in Deutschland von 1996 bis 2016: Eine Sekundäranalyse der Umweltbewusstseinsstudien*. Hrsg. von Angelika Gellrich. Dessau-Rosslau. URL: https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/1410/publikationen/2019-10-17_texte_128-2019_sekundaera_nalyse-umweltbewusstseinstudie.pdf.
- Bollinger, B. und K. Gillingham (2010). *Environmental Preferences and Peer Effects in the diffusion of solar PV*. Hrsg. von Unpublished Manuscript. URL: https://blog.zeit.de/gruenegeschaefte/files/2011/04/BollingerGillingham_PeerEffectsSolar.pdf.
- Chattoe-Brown, E. (2014). »Using Agent Based Modelling to Integrate Data on Attitude Change«. In: *Sociological Research Online* 19.1, S. 159–174. ISSN: 1360-7804. DOI: 10.5153/sro.3315.
- Deffuant, G., F. Amblard, G. Weisbuch und T. Faure (2002). »How can extremism prevail? A study based on the relative agreement interaction model«. In: *Journal of Artificial Societies and Social Simulation* 5.4. URL: <http://jasss.soc.surrey.ac.uk/5/4/1.html>.
- Galvin, R. (2020). »I'll follow the sun: Geo-sociotechnical constraints on prosumer households in Germany«. In: *Energy Research & Social Science* 65, S. 101455. ISSN: 22146296. DOI: 10.1016/j.erss.2020.101455.
- Hesselink, L. X. und E. J. Chappin (2019). »Adoption of energy efficient technologies by households – Barriers, policies and agent-based modelling studies«. In: *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 99, S. 29–41. ISSN: 13640321. DOI: 10.1016/j.rser.2018.09.031.
- IEA (2022). *Unlocking the Potential of Distributed Energy Resources: Power system opportunities and best practices*. Hrsg. von International Energy Agency. URL: https://iea.blob.core.windows.net/assets/3520710c-c828-4001-911c-ae78b645ce67/UnlockingthePotentialofDERs_Powersystemopportunitiesandbestpractices.pdf.
- Islam, T. (2014). »Household level innovation diffusion model of photo-voltaic (PV) solar cells from stated preference data«. In: *Energy Policy* 65, S. 340–350. ISSN: 03014215. DOI: 10.1016/j.enpol.2013.10.004.
- Jacksohn, A., P. Grösche, K. Rehdanz und C. Schröder (2019). »Drivers of renewable technology adoption in the household sector«. In: *Energy Economics* 81, S. 216–226. ISSN: 01409883. DOI: 10.1016/j.eneco.2019.04.001.

- Kraan, O., S. Dalderop, G. J. Kramer und I. Nikolic (2019). »Jumping to a better world: An agent-based exploration of criticality in low-carbon energy transitions«. In: *Energy Research & Social Science* 47, S. 156–165. ISSN: 22146296. DOI: 10.1016/j.erss.2018.08.024.
- Labay, D. G. und T. C. Kinnear (1981). »Exploring the Consumer Decision Process in the Adoption of Solar Energy Systems«. In: *The Journal of Consumer Research* 8.8, S. 271–278. DOI: 10.1086/208865.
- Li, F. G., E. Trutnevvyte und N. Strachan (2015). »A review of socio-technical energy transition (STET) models«. In: *Technological Forecasting and Social Change* 100, S. 290–305. ISSN: 00401625. DOI: 10.1016/j.techfore.2015.07.017.
- Mundaca, L. und M. Samahita (2020). »What drives home solar PV uptake? Subsidies, peer effects and visibility in Sweden«. In: *Energy Research & Social Science* 60, S. 101319. ISSN: 22146296. DOI: 10.1016/j.erss.2019.101319.
- Niamir, L., T. Filatova, A. Voynov und H. Bressers (2018). »Transition to low-carbon economy: Assessing cumulative impacts of individual behavioral changes«. In: *Energy Policy* 118, S. 325–345. ISSN: 03014215. DOI: 10.1016/j.enpol.2018.03.045.
- Palm, J. (2018). »Household installation of solar panels – Motives and barriers in a 10-year perspective«. In: *Energy Policy* 113, S. 1–8. ISSN: 03014215. DOI: 10.1016/j.enpol.2017.10.047.
- Peattie, K. (2010). »Green Consumption: Behavior and Norms«. In: *Annual Review of Environment and Resources* 35.1, S. 195–228. DOI: 10.1146/annurev-environ-032609-094328.
- Petrovich, B., S. L. Hille und R. Wüstenhagen (2019). »Beauty and the budget: A segmentation of residential solar adopters«. In: *Ecological Economics* 164, S. 106353. ISSN: 09218009. DOI: 10.1016/j.ecolecon.2019.106353.
- Rai, V., D. C. Reeves und R. Margolis (2016). »Overcoming barriers and uncertainties in the adoption of residential solar PV«. In: *Renewable Energy* 89, S. 498–505. ISSN: 09601481. DOI: 10.1016/j.renene.2015.11.080.
- Rode, J. und S. Müller (2019). *I Spot, I Adopt! A Discrete Choice Analysis on Peer Effects in Solar Photovoltaic System Adoption of Households*. (2019) Available at SSRN: DOI: 10.2139/ssrn.3469548.
- Rogers, E. M. (2003). *Diffusion of innovations*. 5th ed. New York: Free Press. ISBN: 9780743222099.
- Sawyer, S. W. (1982). »Leaders in change: solar energy owners and the implications for future adoption rates«. In: *Technological Forecasting and Social Change* 21. ISSN: 00401625. DOI: 10.1016/0040-1625(82)90050-6.
- Scheller, F., I. Doser, E. Schulte, S. Johannung, R. McKenna und T. Bruckner (2021). »Stakeholder dynamics in residential solar energy adoption: findings from focus group discussions in Germany«. In: *Energy Research & Social Science* 76, S. 102065. ISSN: 2214-6296. DOI: 10.1016/j.erss.2021.102065.
- Scheller, F., I. Doser, D. Sloot, R. McKenna und T. Bruckner (2020). »Exploring the role of stakeholder dynamics in residential photovoltaic adoption decisions: A synthesis of the literature«. In: *Energies* 13.23, S. 6283. DOI: 10.3390/en13236283.
- Scheller, F., S. Graupner, J. Edwards, S. Johannung, C. Bergaentzle und T. Bruckner (2022). »Social Influence Throughout the Photovoltaic Adoption Process: Explo-

- ring the Impact of Stakeholder Perceptions«. In: *Energy RESEARCH LETTERS* 3.Early View, S. 33903. DOI: 10.46557/001c.33903.
- Schulte, E., F. Scheller, W. Pasut und T. Bruckner (2022). »Product traits, decision-makers, and household low-carbon technology adoptions: moving beyond single empirical studies«. In: *Energy Research & Social Science* 83, S. 102313.
- Schulte, E., F. Scheller, D. Sloot und T. Bruckner (2022). »A meta-analysis of residential PV adoption: the important role of perceived benefits, intentions and antecedents in solar energy acceptance«. In: *Energy Research & Social Science* 84, S. 102339.
- Stern, P. C. (2000). »New Environmental Theories: Toward a Coherent Theory of Environmentally Significant Behavior«. In: *Journal of Social Issues* 56.3, S. 407-424. DOI: 10.1111/0022-4537.00175.
- Wolske, K. S., K. T. Gillingham und P. W. Schultz (2020). »Peer influence on household energy behaviours«. In: *Nature Energy* 5.3, S. 202-212. DOI: 10.1038/s41560-019-0541-9.
- Wolske, K. S., P. C. Stern und T. Dietz (2017). »Explaining interest in adopting residential solar photovoltaic systems in the United States: Toward an integration of behavioral theories«. In: *Energy Research & Social Science* 25, S. 134-151. ISSN: 22146296. DOI: 10.1016/j.erss.2016.12.023.

Entscheidungsverhalten von Wohnungsunternehmen bei grundstücksbezogenen Regenwasserbewirtschaftungsanlagen

Stefan Geyler¹, Marie Moritz¹

Highlights

- Der Beitrag untersucht konzeptionell und literaturbasiert das Entscheidungsverhalten von Wohnungsunternehmen (WU) gegenüber grundstücksbezogenen Regenwasserbewirtschaftungsanlagen (gRWA).
- Die Nutzung von gRWA ist das Ergebnis eines dreiphasigen Adoptionsprozesses, der den Zeitpunkt der Nutzungsentscheidung ("wann"), die Technologiewahl ("welche Anlage") und Lerneffekte umfasst.
- Unternehmensspezifische, grundstücks- und gebäudebezogene, aber auch anlagenspezifische Faktoren beeinflussen zusammen mit der kommunalen Governance die Nutzungsentscheidung.

Einleitung

Wohnungsunternehmen (WU) nehmen eine Schlüsselrolle bei der Umsetzung von grundstücksbezogenen Regenwasserbewirtschaftungsanlagen (gRWA) in urbanen Räumen ein.² Für die nachhaltige Bewirtschaftung von Regenwasser (RW) und die hierfür notwendige systematische Ergänzung bestehender öffentlicher Anlagen um dezentrale Elemente ist es daher

¹Institut für Infrastruktur und Ressourcenmanagement, Universität Leipzig

²Siehe Kapitel zu den Fallstudien in diesem Band.

wichtig, dass die kommunalen Entscheidungsträger verstehen, weshalb Wohnungsunternehmen die gRWA zögerlich oder schnell aufgreifen, ob sie verstärkt Gründächer oder Versickerungslösungen nutzen und ob die Grundstücke dabei vollständig oder teilweise vom Kanal abgekoppelt werden. Das Verhalten von Wohnungsunternehmen entzieht sich jedoch einer einfachen Prognose. Rahmenbedingungen der kommunalen Governance, wie Satzungen oder die Informations- und Förderpolitik, variieren zwischen Kommunen. Governanceaspekte unterscheiden sich mitunter auch innerhalb der Städte, da z. B. Gründachsatzungen auf städtische Teilräume begrenzt sein können. Darüber hinaus weichen sowohl markt- oder unternehmensspezifische Faktoren, wie Mietniveau und Organisationsform der Unternehmen, aber auch naturräumliche und baustrukturelle Gegebenheiten, wie Siedlungsdichte und Bodenverhältnisse, räumlich voneinander ab. Hierfür ist es wichtig, den Entscheidungsprozess der Wohnungsunternehmen bzgl. gRWA besser zu verstehen und zugleich wesentliche Einflüsse auf die Nutzungsentscheidungen zu benennen. Die konzeptionelle Beschreibung des Entscheidungsverhaltens ist daher Gegenstand dieses Kapitels. Es dient als Grundlage für empirische Untersuchungen und zur Erarbeitung eines Konzeptmodells für Nutzungsentscheidungen bzgl. gRWA. Nach einem Überblick zum Entscheidungsverhalten von Organisationen bei Innovationen werden verschiedene Einflussfaktoren im Hinblick auf gRWA diskutiert. Darauf aufbauend wird ein dreiphasiger Ansatz zur konzeptionellen Beschreibung von Nutzungsentscheidungen der Wohnungsunternehmen erarbeitet.

Theoretischer Überblick zum Entscheidungsverhalten

Innovationsprozesse in Unternehmen sind komplex, da viele Personen daran beteiligt sind und diese fördern oder hemmen.³ Abläufe, Einflussfaktoren und Herausforderungen werden u. a. in Rogers Theorie zur Diffusion von Innovationen in Organisationen⁴ erörtert (Abbildung 4.1). Der Entscheidungsprozess wird hierbei in zwei Phasen unterteilt, welche ihrerseits aus mehreren Teilschritten bestehen. Zur ersten Phase, der Initiation, gehören das Agenda Setting und das Matching. Das Agenda Setting beschreibt das Bewusstwerden eines Problems im Unternehmen, das einer Lösung

³Vgl. Rogers, 2003, S. 402 f.; Askarany, 2006.

⁴Vgl. Rogers, 2003, S. 420 f.

bedarf und die Suche nach Lösungsansätzen einleitet. Im Matching-Prozess werden die gefundenen Ansätze genauer betrachtet, und es wird untersucht, wie gut sie jeweils zum Unternehmen und dessen Zielen sowie den äußeren Rahmenbedingungen passen. Diese Initiationsphase beinhaltet alle Aktionen, Entscheidungen und Ergebnisse auf politischer, ökonomischer und sozialer Ebene, die letztlich dazu führen, dass ein Unternehmen sich entweder gegen die Einführung einer Innovation entscheidet oder aber aus der Liste möglicher Innovationen eine auswählt, um diese umzusetzen. In dem Fall ist die Innovation in den Strukturen, Prozessen und Routinen des Unternehmens zu verankern. Diese Implementierungsphase beinhaltet z. B. das Anpassen der Innovation an die unternehmensspezifischen Gegebenheiten, deren strukturelle Einbettung und Integration in die betrieblichen Abläufe.⁵

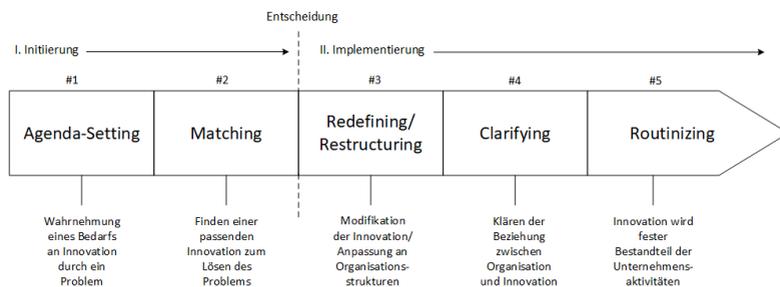


Abbildung 4.1.: Modell zur Diffusion von Innovationen in Organisationen nach Rogers. Eigene Darstellung nach Rogers, 2003, S. 421.

Hinsichtlich der Einflüsse auf die Diffusion von Innovationen lassen sich als Erstes solche benennen, die durch die Neuerungen selbst bestimmt werden. Hierzu zählen ein hoher relativer Vorteil für den Adopter, wobei bei gRWA vor allem anlagen-, grundstücks- bzw. gebäudebezogene oder governancebezogene Einflüsse auf Nutzen und Kosten auftreten. Weiterhin beeinflussen die Kompatibilität der gRWA mit Normen und Werten, deren Einfachheit bei Errichtung und Betrieb, die Möglichkeit zum Testen der Innovationen sowie deren Sichtbarkeit für andere die Adoptionsrate. Darüber hinaus hängt die Adoption der Innovationen auch von sozialen Einflüssen

⁵Vgl. ebd., S. 420 f.

ab, z. B. vom Vorhandensein von Kommunikationskanälen, von Change Agenten, die das Vertrauen in die Innovationen fördern, sowie von sozialen Normen. Schließlich spielen auch unternehmensspezifische Merkmale wie Unternehmensstruktur, -kultur und -strategie eine wichtige Rolle.⁶ Im Folgenden werden relevante Faktoren für die Nutzungsentscheidung von gRWA betrachtet.

Vorteilhaftigkeit für Wohnungsunternehmen

In der Regel bestimmt die relative Vorteilhaftigkeit einer Innovation maßgeblich deren Adoption durch Unternehmen.⁷ Allerdings stellen wesentliche Nachhaltigkeitsleistungen von gRWA zum Überflutungs- und Gewässerschutz sowie zur Klimaanpassung aus der Sicht der WU positive externe Effekte und damit Nutzen für das Gemeinwohl dar. Sie sind für WU nur dann entscheidungsrelevant, wenn:

- die Unternehmen aufgrund ihrer Unternehmenspolitik nachhaltige Stadtentwicklung unterstützen,
- die Nachhaltigkeitsleistungen durch die Mieter:innen unter Zahlungsbereitschaft nachgefragt werden oder
- die Gemeinwohleffekte durch die Kommune gefördert (z. B. Entgeltreduktion, Fördermittel) oder sogar eingefordert werden (z. B. Gründachsatzungen, Einleitbegrenzungen in den Kanal).

Der Umfang der internalisierten Nutzen moduliert entsprechend die Entscheidung bzgl. der gRWA, in die ansonsten vor allem die Kosten einfließen würden.⁸ Anlagen zur Retention und Versickerung sind bei entsprechender Flächenverfügbarkeit i. d. R. deutlich günstiger als Gründachanlagen.⁹ Eine vollständige Abkopplung ist aufgrund des größeren Aufwands kostenträchtiger als eine Teilabkopplung. Ohne Berücksichtigung der Nutzen würden WU wahrscheinlich keine gRWA oder nur einfache Versickerungslösungen favorisieren. Zusätzlich treten bei den Kosten, aber auch bei finanziellen Entlastungen durch eingesparte RW-Entgelte Verteilungskonflikte zwischen

⁶Vgl. Askarany, 2006; Rogers, 2003; van Oorschot u. a., 2020.

⁷Vgl. Askarany, 2006; van Oorschot u. a., 2020.

⁸Vgl. Gan u. a., 2015; Hojnik und Ruzzier, 2016; van Oorschot u. a., 2020.

⁹Vgl. Leimbach u. a., 2018; Muschalla u. a., 2014; Strehl u. a., 2017.

Vermietenden und Mietenden auf. Außer im Fall von Wohnungsgenossenschaften nutzen die Eigentümer und Eigentümerinnen der WU die Wohnungen in der Regel nicht selbst und die Interessen beider Parteien weichen in Bezug auf die gRWA voneinander ab. Dieses Vermieter-Mieter-Dilemma kann sich negativ auf die Investitionsentscheidungen der Unternehmen auswirken.¹⁰ Die Möglichkeiten und Grenzen der Kostenverlagerungen auf die Mietparteien sind komplex und ebenso maßnahmenabhängig (z. B. §§ 555b, 559 BGB, §2 BetrKV) wie die tariflichen Reduktionsmaßstäbe bei Regenwasserentgelten.¹¹ Zum Verständnis der Nutzung von gRWA müssen daher zusätzlich zu den Innovationsmerkmalen der Anlagen unternehmensspezifische Faktoren und Governanceaspekte betrachtet werden. Darüber hinaus beeinflussen auch grundstücks- und gebäudespezifische Faktoren das Adoptionsverhalten.¹²

Unternehmensspezifische und marktliche Einflüsse

Eine unternehmenspolitisch bestimmte Motivation, die externen Nutzen der gRWA zu würdigen, liegt am ehesten bei kommunalen WU und insbesondere bei Genossenschaften vor. Kommunalen Unternehmen werden durch die Eigentümer häufig Vorgaben hinsichtlich sozialverträglicher Wohnungsverorgung und Mietenpolitik, aber auch bezüglich der Entwicklung attraktiver Stadtquartiere gemacht.¹³ Gleichzeitig müssen sie auskömmliche Gewinne erwirtschaften und entsprechend Kompromisse eingehen.¹⁴ Bei Wohnungsgenossenschaften steht die adäquate Wohnraumversorgung der Mitglieder:innen an erster Stelle;¹⁵ bezahlbare Mietpreise und die Schaffung einer guten Wohnqualität haben oberste Priorität.¹⁶ Zugleich wird Genossenschaften eine höhere Bereitschaft zugeschrieben, nur langfristig rentable Investitionen, z. B. für den Klimaschutz, zu nutzen.¹⁷ Im Wesentlichen gewinnorientiert handeln dagegen privatwirtschaftliche

¹⁰Vgl. Busse, 2012 S. 217.

¹¹Vgl. Geyler u. a., 2019.

¹²Vgl. van Oorschot u. a., 2020.

¹³Vgl. Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung, 2010, S. 66.

¹⁴Vgl. Hain, 2009.

¹⁵Vgl. Deutsches Institut für Urbanistik, 2009; Metzmacher und Oettgen, 2016, S. 35 f.

¹⁶Vgl. Deutsches Institut für Urbanistik, 2009.

¹⁷Vgl. Wendorf und Wemheuer, 2014, S. 167.

Wohnungsunternehmen.¹⁸ Sie würdigen daher externe Umweltnutzen tendenziell weniger. Allerdings findet auch im privatwirtschaftlichen Bereich eine Diskussion über Corporate Responsibility und Umweltmanagement statt.¹⁹ Das Vermieter-Mieter-Dilemma selbst wird am stärksten bei privatwirtschaftlichen und am geringsten bei Genossenschaften ausgeprägt sein. Wohnungsgenossenschaften vermieten in erster Linie nur an Personen, die der Genossenschaft beitreten (§1 GenG), daher verfügen die Personen zugleich über Mitbestimmungsrechte. Schließlich lassen sich Unternehmen auch in Bezug auf Innovativität unterscheiden, indem Innovatoren und Early Adopters von der Mehrheit sowie von Laggards abgegrenzt werden.²⁰ Hierbei zeigt sich unter anderem, dass große Unternehmen aufgrund ihrer besseren finanziellen und informatorischen Ausstattung i. d. R. innovativer sind als kleine.²¹ Die Innovationsneigung kann somit auch innerhalb der Unternehmensgruppen variieren.

Kommunale Governance

Aufgrund der begrenzten Eigenmotivation von WU bzgl. der Nutzung von gRWA spielt die kommunale Governance eine wichtige Rolle, da hierdurch Maßnahmen von außen gefördert oder gefordert werden können. Ver- und Gebote sowie finanzielle und informatorische Steuerungsansätze überlagern sich hierbei innerhalb von länderspezifischen Rechtsrahmen.²² Der gleichwohl deutliche kommunale Gestaltungsspielraum führt zu spezifischen Governance-Settings, die sich u. a. in folgenden Aspekten unterscheiden können: (i) einer generellen oder ortsspezifischen Nutzungspflicht bei gRWA z. B. aufgrund der Auslegung von Landesgesetzen, aufgrund von kommunalen Satzungen, Verordnungen oder im Rahmen von kommunalen Planungen²³; (ii) der Höhe der Regenwasserentgelte und spezifischen Befreiungstatbestände für einzelne gRWA²⁴; (iii) der finan-

¹⁸Vgl. Hain, 2009, S. 22, Schätzl u. a., 2007, S. 21.

¹⁹Vgl. Hain und Redder, 2021; allerdings spielt Wasser im Vergleich zu Fragen der Energieeffizienz eine wesentlich geringere Rolle.

²⁰Vgl. Rogers, 2003, S. 282.

²¹Vgl. Mahler und Rogers, 1999; van Oorschot u. a., 2020.

²²Für eine Übersicht - siehe Reese und Fischer, im Erscheinen.

²³Vgl. ebd.

²⁴Vgl. Geyley u. a., 2019.

ziellen Förderung einzelner oder aller gRWA zur Entlastung der WU²⁵; (iv) der Informationsbereitstellung und dem Service bei Planungs- und Genehmigungsprozessen zur Verringerung von Unsicherheit und Transaktionskosten (z. B. Regenwasseragentur Berlin). Bei Ausgestaltung der Governanceregeln und bei Planung/Genehmigung wirken zahlreiche kommunale und überkommunale Akteure mit (Tabelle 4.1). Sie bestimmen zusammen das Ausmaß der Förderung und Forderung bzgl. gRWA sowie die Konsistenz des Governancerahmens, jedoch unterscheiden sich ihre Kompetenzen gegenüber den Wohnungsunternehmen. Während sich Stadtrat, Aufgabenträger und Umweltbehörden (Tabelle 4.1 – Position oberhalb der WU) gegenüber Wohnungsunternehmen durchsetzen können und über Ver- und Gebote (Satzungen, Verordnungen), finanzielle (Fördermittel, RW-Entgelt) und informatorische Instrumente (Leitfäden, ...) verfügen, können Ingenieurbüros und Wohnungsdachverbände nur beratend einwirken (Tabelle 4.1 - Position unterhalb der Wohnungsunternehmen). Zahlreiche Akteure können zudem als Diffusionsagenten ("change agents") eine wichtige Rolle bei der Durchsetzung von Innovationen übernehmen (Tabelle 4.1).²⁶ Sie machen auf die Innovation und potenzielle Bedarfe aufmerksam, informieren selbst oder richten ein Informationsnetzwerk ein. Für die Wohnungsunternehmen verringert sich hierdurch die Unsicherheit bzgl. der Innovation.²⁷

Grundstücks- und gebäudebezogene Einflüsse

Für die Adoptionsgeschwindigkeit von gRWA ist relevant, inwieweit deren Errichtung in engem Zusammenhang mit Baumaßnahmen am Gebäude, d. h. Neubau, Sanierung oder Modernisierung, steht oder unabhängig hiervon vorgenommen wird. Als Neubaurate wird für die neuen Bundesländer ein Wert von 0,3 % pro Jahr und für die alten Bundesländer 0,5 % pro Jahr angegeben.²⁸ Die Modernisierungsrate (bezogen auf Wärmeschutz) wird mit knapp 1 % angegeben.²⁹ Nur wenn gRWA auch außerhalb derartiger baulicher Gelegenheitsfenster errichtet werden, kann sich deren

²⁵ Vgl. Regenwasseragentur, 2019.

²⁶ Vgl. van Hal, 2000, S. 78 f., 86 f.

²⁷ Vgl. Rogers, 2003, S. 369 f.

²⁸ Vgl. Bigalke u. a., 2016, S. 71.

²⁹ Vgl. Rein, 2016, S. 5 f.

Tabelle 4.1.: Akteure der RW-Governance, Funktionen sowie nutzbare Instrumente – Auswahl. Eigene Darstellung.

Akteur	Funktion in Bezug auf gRWA	Instrument
Stadtrat*	Beschluss kommunaler Satzungen, Verordnungen, Förder- u. Informationsprogramme	VG, F, I
Kommunale Aufgabenträger der Abwasserentsorgung*	Erarbeitung Abwassersatzung, Genehmigung Grundstücksentwässerung, Entgeltkalkulation	VG, F, I
Abwasserentsorger*	Errichtung und Betrieb der öffentlichen Anlagen zur RW-Entsorgung, Entgeltkalkulation	VG, F, I
Untere Wasser-, Natur-, Bodenschutzbehörde	Prüfung Umweltauswirkungen der gRWA z. B. bzgl. Gewässer- und Bodenschutz	VG, F, I
Umweltamt u. a.*	Informationsbereitstellung, Erarbeitung von Förderprogrammen	F, I
Stadtplanungsamt*	Rechtliche Festsetzungen zu RW-Bewirtschaftung bei B-Planung	VG
Normungsverbände	Festlegen des SdT bzgl. gRWA	I
Wohnungsunternehmen*	Nutzungsentscheidung u. Technologiewahl von gRWA, Bau und Betrieb, tlw. Kostenträger	
Mieter:innen*	Akzeptanz der gRWA, tlw. Kostenträger, Nutznießer bzgl. reduzierter RW-Entgelte u. Nachhaltigkeitsleistungen	F, I
Bürger:innen/Allgemeinheit	Nutznießer der Nachhaltigkeitsleistungen durch gRWA	I
Ingenieurbüros*	Planung der gRWA	F, I
Hersteller von Anlagen / Baufirmen*	Produktion, Verkauf u. Errichten von gRWA	F, I
Wohnungsdachverbände*	Interessenvertretung der WU und Informationsvermittlung	I

VG – Ver- und Gebote; F – Finanzielle Instrumente; I – informatorische Instrumente; SdT — Stand der Technik; *Potenzielle Diffusionsagenten.

Diffusionsrate von der Häufigkeit der Baumaßnahmen abkoppeln. Darüber hinaus beeinflussen grundstücks- und gebäudebezogene Faktoren die Technologiewahl. So wird auf die bessere Eignung von freistehenden Grundstücken und Zeilenbebauung für die Errichtung von Versickerungslösungen im Vergleich zu Blockrandbebauung verwiesen.³⁰ Zusätzlich spielen die Verfügbarkeit und Lage von Freiflächen sowie die Zugänglichkeit für Baumaschinen eine Rolle bzw. müssen Flächenkonkurrenzen

³⁰Vgl. Geiger u. a., 2009; Hamburger Stadtentwässerung AöR und Stadt Hamburg, Behörde für Umwelt und Energie, 2015; Heber, 1998.

beachtet werden.³¹ Eine schlechte Versickerungsfähigkeit des Bodens, hohe Grundwasserabstände sowie Bodenverunreinigungen begrenzen die Nutzung von Versickerungsanlagen ebenfalls. Bei Gründachanlagen stellen sich Ansprüche an die Dachform und Dachstatik.³²

Konzept zur Beschreibung der Nutzungsentscheidung

Auf den literaturbasierten Erkenntnissen aufbauend wurde eine konzeptionelle Beschreibung zur Nutzungsentscheidung der WU erarbeitet, die die weiteren empirischen Untersuchungen strukturiert.³³ Zwei Entscheidungen wurden dabei in den Mittelpunkt gestellt: Wann entscheiden die Wohnungsunternehmen, eine gRWA bei einer ihrer Immobilien zu installieren, und welche Technologie wird ausgewählt? Die Implementierung in betriebliche Abläufe wird nicht betrachtet, jedoch wird die Möglichkeit einbezogen, dass die Unternehmen rückblickend eine Beurteilung vornehmen und Schlussfolgerungen bzgl. anderer Immobilien ihres Unternehmens ziehen. Daher wurde ein dreistufiger konzeptioneller Rahmen gewählt, der sich an Rogers Theorie anlehnt (Abbildung 4.2).

Bei der grundsätzlichen Nutzungsentscheidung (P1) wird betrachtet, zu welcher baulichen Gelegenheit und mit welcher Wahrscheinlichkeit eine gRWA errichtet wird, d. h.:

- Wie oft werden Entscheidungen zur baulichen Entwicklung von Gebäuden getroffen, insb. zu Neubau, Sanierung oder Modernisierung?
- In welchem Umfang werden bei diesen Gelegenheiten gRWA errichtet bzw. wie oft entstehen diese unabhängig hiervon?

Im Rahmen der Technologiewahl (P2) wird die spezifische Anlage ausgewählt. Dabei werden fünf Optionen unterschieden: Versickerungs- oder Gründachlösungen mit je teilweiser oder vollständiger Abkopplung des Grundstücks vom öffentlichen Kanal. Nulloption ist der vollständige Verbleib am Kanal. Teilaspekte sind:

- die Eingrenzung der zur Entscheidung anstehenden gRWA-Optionen, z. B. aufgrund von Gründachverordnungen, Einleitbegrenzungen

³¹Vgl. Kaiser, 2004; Wüstneck, 2020.

³²Vgl. Behörde für Stadtentwicklung und Umwelt, Hamburg, 2006.

³³Siehe Kapitel zur empirischen Untersuchung und zum Konzeptmodell.

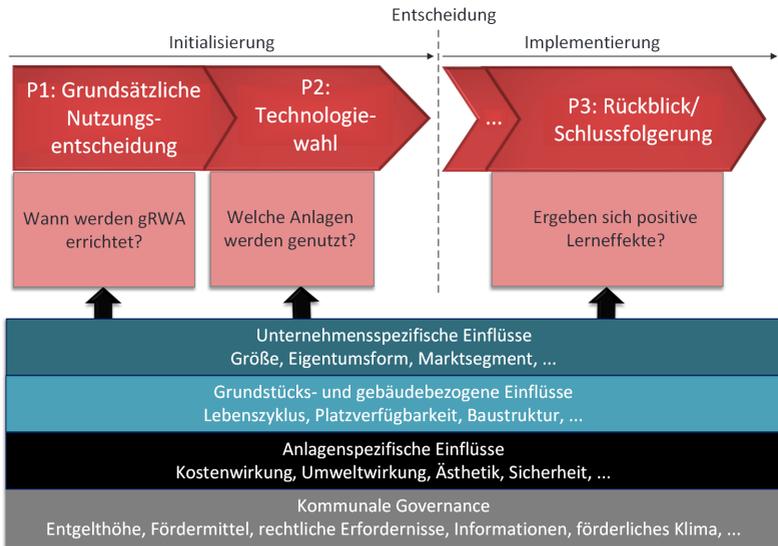


Abbildung 4.2.: Konzept zur Beschreibung der Nutzungsentscheidung für gRWA. Eigene Darstellung.

in die Kanalisation, wasserrechtlichen Versickerungsverboten oder baustrukturellen Restriktionen, z. B. aufgrund der Dachform;

- die Bewertung der verbleibenden Handlungsoptionen und Auswahl einer gRWA-Option im Vergleich zum Verbleib am Kanal.

Im Zuge der Implementierung konzentriert sich die Analyse auf das rückblickende Überdenken der Entscheidung und das Ableiten von Schlussfolgerungen für zukünftige Nutzungen von gRWA (P3). Die potentiellen Einflussfaktoren auf die Entscheidung wurden vier Gruppen zugeordnet (Abbildung 4.2); sie können den Entscheidungsprozess in einer oder allen drei Phasen beeinflussen. Beispielsweise:

- beeinflusst die Entgelthöhe vor allem die Bewertung der gRWA-Optionen (Phase 2);
- erhöhen rechtliche Wirkungen wie Einleitbegrenzungen, Gründachverordnungen o. Ä. die Wahrscheinlichkeit einer Nutzung im Zuge

von baulichen Entwicklungen (Phase 1) und bestimmen zugleich die Technologiewahl (Phase 2);

- beeinflussen die Unternehmensgröße und die Innovativität die Bereitschaft zur Nutzung von gRWA (Phase 1). Zugleich wirken sich Lerneffekte (Phase 3) auf künftige Bauprojekte des WU aus.

In der Literatur wird auf eine Vielzahl weiterer Faktoren verwiesen.³⁴ Vor diesem Hintergrund ist das Konzept ein stark vereinfachtes Modell. Gleichwohl überlagern sich schon hier die einbezogenen Faktoren und variieren in ihrer Ausprägung nicht nur zwischen den Kommunen, sondern auch innerhalb von Kommunen. Somit vermag das vorgestellte Konzept komplexe Adoptionsmuster zu beschreiben.

Zusammenfassung

Es wurde ein Konzept zur vereinfachten Beschreibung der Nutzungsentscheidung von Wohnungsunternehmen bzgl. gRWA vorgestellt, das den Entscheidungsprozess transparenter macht und die Möglichkeit bietet, Schlüsselfaktoren auf das Entscheidungsverhalten abzugrenzen und in ihren Wechselwirkungen zu beurteilen. Hierbei wurde von zwei zentralen Phänomenen ausgegangen: dem hohen Gemeinwohlbeitrag von gRWA, der aus Sicht der Unternehmen einen externen Nutzen darstellt, und dem Vermieter-Mieter-Dilemma inkl. den sich hieraus ergebenden Einflüssen auf die Entscheidung zu gRWA. Die Entscheidung wird vereinfacht als dreistufiger Prozess beschrieben – bestehend aus der grundsätzlichen Nutzungsentscheidung, der Technologiewahl und Lerneffekten –, in den unternehmens- und anlagenspezifische, aber auch grundstücksbezogene Faktoren und die kommunale Governance hineinspielen. Das Konzept dient als Grundlage für empirische Untersuchungen und zur Erarbeitung eines Konzeptmodells zu Nutzungsentscheidungen bzgl. gRWA.

Danksagung

Dieser Beitrag wurde finanziert durch das Projekt „Smart Utilities and Sustainable Infrastructure Change“ (Antragsnummer 100378087 (SAB)).

³⁴Vgl. Askarany, 2006; Gan u. a., 2015; van Oorschot u. a., 2020.

Diese Maßnahme wird mitfinanziert durch Steuermittel auf der Grundlage des vom Sächsischen Landtag beschlossenen Haushaltes.



DOI: <https://doi.org/10.30819/5413.04>

Literatur

- Askarany, D. (2006). »Characteristics of Adopters and Organizational Changes«. In: *Thunderbird International Business Review* 48,5, S. 705–725. DOI: 10.1002/tie.20117.
- Behörde für Stadtentwicklung und Umwelt, Hamburg, Hrsg. (2006). *Dezentrale naturnahe Regenwasserbewirtschaftung*. URL: <https://www.hamburg.de/regenwasserbroschuere/>.
- Bigalke, U., A. Armbruster, F. Lukas, O. Krieger, C. Schuch und J. Kunde (2016). *Statistiken und Analysen zur Energieeffizienz im Gebäudebestand: dena-Gebäudereport*. Hrsg. von Deutsche Energie-Agentur GmbH. Berlin. URL: https://www.dena.de/fileadmin/user_upload/8162_dena-Gebaeudereport.pdf.
- Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung, Hrsg. (2010). *Strategien der Kommunen für ihre kommunalen Wohnungsbestände: Ergebnisse einer Kommunalbefragung*. Berlin.
- Busse, D. (2012). *Nachhaltigkeitsaspekte in Theorie und Praxis der Entscheidungsfindung: Perspektiven institutioneller Steuerung in der Immobilienwirtschaft*. Wiesbaden: Gabler. DOI: 10.1007/978-3-8349-3972-2.
- Deutsches Institut für Urbanistik, Hrsg. (2009). *Wohnungsgenossenschaften und Kommunen: Verborgene Potenziale der Zusammenarbeit besser nutzen*. Berlin. URL: <https://difu.de/sites/default/files/archiv/publikationen/zeitschriften/difu-berichte/ber-09-4.pdf>.
- Gan, X., J. Zuo, K. Ye, M. Skitmore und B. Xiong (2015). »Why sustainable construction? Why not? An owner's perspective«. In: *Habitat International* 47, S. 61–68. DOI: 10.1016/j.habitatint.2015.01.005.
- Geiger, W., H. Dreiseitl und J. Stemplewski (2009). *Neue Wege für das Regenwasser*. München: Oldenbourg Industrieverlag. ISBN: 978-3-8356-3178-6.
- Geyler, S., N. Bedtke und E. Gawel (2019). »Sustainable Stormwater Management in Existing Settlements: Municipal Strategies and Current Governance Trends in Germany«. In: *Sustainability* 11,19, S. 1–23. DOI: 10.3390/su11195510.
- Hain, M. (2009). *Die Performance von öffentlichen Unternehmen am Beispiel von Wohnungsunternehmen in Deutschland*. Schriften zum europäischen Management. Wiesbaden: Gabler. DOI: 10.1007/978-3-8349-8792-1.
- Hain, M. und S. Redder (2021). *Sustainability Reporting in der Wohnungswirtschaft: Eine Meta-Analyse der Nachhaltigkeitsberichte der deutschen Top 50 Wohnungsunternehmen*. URL: <https://www.ritterwald.de/publications/sustainability-reporting-in-der-wohnungswirtschaft>.

- Hamburger Stadtentwässerung AöR und Stadt Hamburg, Behörde für Umwelt und Energie, Hrsg. (2015). *RISA Strukturplan Regenwasser 2030: Ergebnisbericht des Projektes RISA - RegenInfraStrukturAnpassung*. Hamburg.
- Heber, B. (1998). *Naturnahe Regenwasserbewirtschaftung in Siedlungsgebieten*. IÖR-Schriften 25. Dresden.
- Hojnik, J. und M. Ruzzier (2016). »What drives eco-innovation? A review of an emerging literature«. In: *Environmental Innovation and Societal Transitions* 19, S. 31–41. DOI: 10.1016/j.eist.2015.09.006.
- Kaiser, M. (2004). »Naturnahe Regenwasserbewirtschaftung als Baustein einer nachhaltigen Siedlungsentwicklung - demonstriert mithilfe der Entwicklung und Umsetzung von Modellprojekten«. Diss. Dortmund: Universität Dortmund. DOI: 10.17877/DE290R-14934.
- Leimbach, S., T. Brendt, G. Ebert, N. Jackisch, F. Zieger und S. Kramer (2018). *Regenwasserbewirtschaftungsanlagen in der Praxis: Betriebssicherheit, Kosten und Unterhaltung*. DOI: 10.6094/UNIFR/16551.
- Mahler, A. und E. M. Rogers (1999). »The diffusion of interactive communication innovations and the critical mass: the adoption of telecommunications services by German banks«. In: *Telecommunications Policy* 23.10-11, S. 719–740. DOI: 10.1016/S0308-5961(99)00052-X.
- Metzmacher, M. und N. Oettgen (2016). *Wohnungsgenossenschaften als Partner der Kommunen: Bündnis für bezahlbares Wohnen und Bauen*. Bonn. URL: [urn:nbn:de:101:1-20161214964](https://nbn-resolving.org/urn:nbn:de:101:1-20161214964).
- Muschalla, D., G. Gruber und R. Scheucher (2014). *ECOSTORMA - Ökologische und ökonomische Maßnahmen der Niederschlagswasserbewirtschaftung*. Wien.
- Reese, M. und H. Fischer (im Erscheinen). »Rechtlicher Rahmen und Handlungsbedarf zur Transformation der Abwasserinfrastruktur«. In: *Wege zum abflussfreien Stadtquartier – Potentiale, Wirkungen und Rechtsrahmen des ortsnahen Schmutz- und Regenwassermanagements: FKZ 3716 15 333 0*. Hrsg. von Umweltbundesamt. Dessau - Roßlau.
- Regenwasseragentur, B. (2019). *Förder- und Einsparmöglichkeiten im Überblick: Umsetzen*. Hrsg. von Berliner Regenwasseragentur. Berlin. URL: <https://www.regenwasseragentur.berlin/foerderprogramme-einsparungen/>.
- Rein, S. (2016). *Datenbasis zum Gebäudebestand: Zur Notwendigkeit eines besseren Informationsstandes über die Wohn- und Nichtwohngebäude in Deutschland*. BBSR-Analysen KOMPAKT. Bonn.
- Rogers, E. M. (2003). *Diffusion of innovations*. 5th ed. New York: Free Press. ISBN: 9780743222099.
- Schätzl, L., H. Oertel, J. Banse, W. Killische, S. Jentsch, J. Glatter und K. Kaufmann (2007). *Investitionsprozesse im Wohnungsbestand – unter besonderer Berücksichtigung privater Vermieter*. Berlin und Bonn. ISBN: 9783879944613.
- Strehl, C., M. Offermann, A. Hein und B. Heinzmann (2017). *Ökonomische Effekte der Regenwasserbewirtschaftung am Beispiel Berlins: IWW-Teilbericht: Ökonomische Effekte der Regenwasserbewirtschaftung am Beispiel Berlins*. URL: <https://www.tib.eu/de/suchen/id/TIBKAT:890696810/>.
- van Hal, A. (2000). »Beyond the demonstration project: The diffusion of environmental innovations in housing«. Diss. Rotterdam: Technische Univ. Delft.

- van Oorschot, J. A., J. I. Halmann und E. Hofmann (2020). »Getting innovations adopted in the housing sector«. In: *Construction Innovation* 20.2, S. 285–318. DOI: 10.1108/CI-11-2018-0095.
- Wendorf, G. und C. Wemheuer (2014). »Wohnungsgenossenschaften als städtische Akteure im Klimaschutz«. In: *Genossenschaften und Klimaschutz*. Hrsg. von C. Schröder und H. Walk. Wiesbaden: Springer Fachmedien, S. 167–201.
- Wüstneck, T. (2020). »Einflussfaktoren auf die Hofnutzung in Bestandswohngebieten: unveröffentlicht«. Masterarbeit. Leipzig: Universität Leipzig.

Szenarien für den zukünftigen Ausbau von Photovoltaik im kommunalen Bereich

André Grüttner¹

Highlights

- Das Kapitel zielt darauf ab, das Ausbaupotenzial für PV-Kleinanlagen in Leipzig abzuschätzen.
- Hierzu entwickelt der Beitrag vier Szenarien für den Zubau bis 2030.
- Die Szenarien umfassen je nach Szenario eine Hebung von 13-50% des Gesamtpotentials nach Solardachkataster.
- Handlungsoptionen von Kommunen werden primär in einer aktiven Steuerungsstrategie zur Beeinflussung des Verhaltens privater Gebäudeeigentümer gesehen.

Die Rolle der Kommunen in der Energiewende

Das energiepolitische Ziel der Energiewende und damit des Ausbaus der erneuerbaren Stromerzeugung erfordert einen grundlegenden Wandel des Energiesystems. Dabei sind alle relevanten Akteure einzubinden. Umsetzungsebene ist dabei faktisch die kommunale Ebene. Dabei können durchaus beträchtliche (theoretische) Potenziale gehoben werden. Je nachdem, wie es einer Kommune gelingt, durch bestimmte Instrumente ausreichend Anreize zu schaffen, können besonders auch bei der größten Gruppe von Gebäudeeigentümern – private Eigentümer – große Mengen erneuerbarer Energie erschlossen werden. In der Beispielkommune Leipzig liegt dieses theoretische Potenzial bei gut 714.000 kWp PV-Leistung. Mit

¹Institut für öffentliche Finanzen und Public Management, Universität Leipzig

Blick auf die privaten Haushalte kann hier eine Steuerung über bestimmte Instrumente erfolgen, welcher sich die Kommune zur Lenkung bedienen kann. Neben fiskalischen Steuerungsinstrumenten, Instrumenten der räumlichen und städtebaulichen Entwicklungsplanung (formelle Instrumente) und informellen Instrumenten können hier v. a. auch kommunale Unternehmen, bspw. Energieversorgungsunternehmen (EVU), ein geeignetes Steuerungsinstrument darstellen. Anknüpfungspunkt ist hier i. d. R. der Anpassungsbedarf der EVU an die veränderten Marktbedingungen und Veränderungen im Marktumfeld ebenfalls infolge der Energiewende. Da das „klassische“ Kerngeschäft zunehmend erodiert bzw. in der Bedeutung für die Unternehmenstätigkeit immer weiter zurückgedrängt wird, ergeben sich insbesondere auf Basis neuer Geschäftsfelder an der Schnittstelle zu anderen Wirtschafts- bzw. Infrastruktursektoren auch Anknüpfungspunkte, um über kommunale Unternehmen das Entscheidungsverhalten privater Haushalte im Sinne einer entsprechenden kommunalpolitischen Zielstellung zu beeinflussen. Grundsätzlich sind dabei für EVUs verschiedene Optionen denkbar: die Erschließung neuer Geschäftsfelder im Kontext von Energiewende und Digitalisierung („Energiewirtschaft 4.0“), im Kontext der Elektromobilität oder auf Basis des Ausbaus von EE-Anlagen und der Energieeffizienz von Gebäuden.

Das Ausbaupotenzial für PV-Kleinanlagen in der Beispielkommune Leipzig

Um exemplarisch für die Beispielkommune Leipzig mögliche zukünftige Wertschöpfungseffekte aus PV-Kleinanlagen, aber auch Ausbaupfade für mögliche veränderte Verhaltensweisen der Privathaushalte in der Stadt infolge steuernder Maßnahmen der Stadt Leipzig abschätzen zu können, erfolgte eine Fortschreibung der bisherigen Entwicklung des PV-Ausbaus (Klein- bzw. Dachanlagen) auf Basis des theoretisch möglichen Aus- bzw. Zubaupotenzials sowie differenziert nach den Eigentümergruppen (1) Stadt/Kommune, (2) kommunale Unternehmen, (3) private Eigentümer und (4) andere Eigentümer der Gebäude. Mit Blick auf die Gesamtstadt zeigt sich dabei, dass der Gebäudebestand zu über 85% in Privatbesitz ist, knapp 7% gehören anderen Eigentümern, wobei dort die Stadt Leipzig mit knapp 6% dominiert. Zu weiteren 6% der Gebäude erfolgte keine Angabe

zum Eigentümer. Etwas verändert ergeben sich dann die Potenziale an installierbarer PV-Leistung; gut 75% des Potenzials ist auf privaten Gebäuden installierbar und 13% auf den Gebäuden der anderen Eigentümergruppen, wobei etwa die Hälfte (ca. 6% des Gesamtpotenzials) auf die Gebäude der Stadt Leipzig entfällt sowie knapp 4% auf die Gebäude kommunaler bzw. öffentlicher Unternehmen. Auf die Gebäude ohne Angaben des Eigentümers entfallen nochmals knapp 13% des Gesamtpotenzials. Mit Blick auf die Stadtbezirke zeigen sich dabei teilweise deutliche Unterschiede sowohl bezogen auf den Gebäudebestand als auch das installierbare PV-Potenzial. Demzufolge kann es zur Potenzialhebung für die Stadt durchaus sinnvoll sein, eine räumlich differenzierende Strategie zu entwickeln. In Anlehnung an die grundsätzlichen Möglichkeiten einer Kommune, den Ausbau von PV-Kleinanlagen durch bestimmte Instrumente zu beeinflussen sowie mit Blick auf die Eigentümerstruktur der Gebäude in Leipzig wurden vier Szenarien S1-S4 für den Zubau abgeleitet und die entsprechenden Ausbaufade bis 2030 nach den einleitend benannten Annahmen berechnet:

- | | |
|-----|---|
| S 1 | „Trendfortschreibung Zubau gemäß Marktstammdatenregister (MaStR)“ („Trend“): Für alle Eigentümergruppen erfolgte eine einfache Trendfortschreibung mit gleitendem Durchschnitt für die Jahre 2021 bis 2050. |
| S 2 | „Potenzialhebung kommunaler Gebäudebestand“ („Kommunal“): Das Potenzial der kommunalen Gebäude (Stadt Leipzig und kommunale Unternehmen) wird mit einer jährlich um 30% gegenüber dem Vorjahr steigenden Zubaurate zu 75% des Gesamtpotenzials gehoben. Bei den anderen Eigentümergruppen erfolgt eine Trendfortschreibung nach Szenario „Trend“. |
| S 3 | „Potenzialhebung privater Gebäudebestand“ („Privat“): Diverse durch die Stadt ergriffene Maßnahmen führen zu einer Potenzialhebung von 50% des Gesamtpotenzials des privaten Gebäudebestands. Dabei steigert sich die jährliche Zubaurate um 15% gegenüber dem Vorjahr. Für die anderen Eigentümergruppen erfolgt wiederum nur eine Trendfortschreibung gemäß dem Szenario „Trend“. |
| S 4 | „Potenzialhebung gesamter Gebäudebestand“ („graduell“): Für alle Eigentümergruppen wurde ein spezifischer Hebel für das Gesamtpotenzial festgelegt, welcher mit jährlich steigendem Zuwachs fortgeschrieben wurde. |

Im Ergebnis würden unter Berücksichtigung aller bisher benannten Annahmen zum Potenzial und der Berechnungsmethodik die jährlichen Zubauraten der vier Szenarien bis 2050 die in Abbildung 5.1 dargestellten Werte umfassen. Die darauffolgenden Ausführungen fassen die einzelnen Szenarien auf Ebene der Stadtbezirke zusammen.

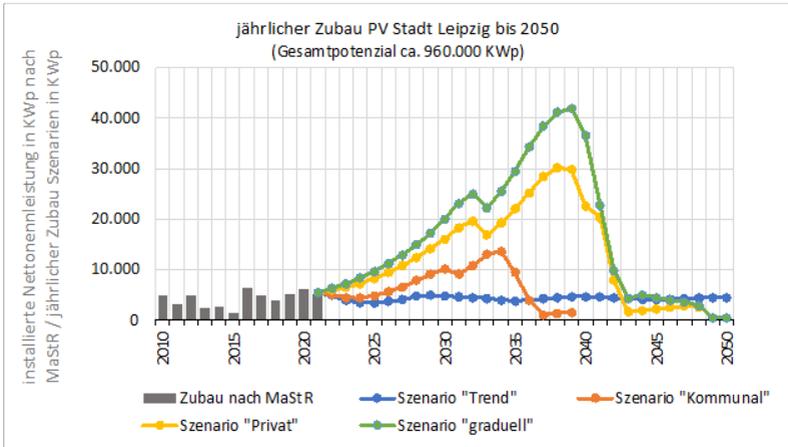


Abbildung 5.1.: Ausbauszenarien bei Hebung der Potenziale. Eigene Darstellung und Berechnung. Datengrundlage: Stadt Leipzig 2010 und Bundesnetzagentur 2021.

Würde der Zubau an PV-Leistung bis 2050 entsprechend des realen Zubaus von 2010 bis 2021 erfolgen (Szenario 1), so würde der Zubau an PV-Leistung bis 2050 ca. 122.000 kWp betragen, was 13% des im Solardachkataster erfassten Gesamtpotenzial entspricht. Dabei würde der Ausbau in den Stadtbezirken zwischen 9,6% (Stadtbezirk Ost) und 19,2% (Stadtbezirk Süd) des jeweils theoretisch zubaubaren Potenzials (zwischen gut 43.500 kWp im Stadtbezirk West und knapp 138.000 kWp im Stadtbezirk Ost) liegen und schwerpunktmäßig in den nördlichen Stadtbezirken erfolgen. Die jährlich zugebaute Leistung würde dabei zwischen knapp 3.400 kWp und gut 4.900 kWp liegen.

Wenn unterstellt wird, dass die Kommune und ihre Unternehmen einerseits im Sinne einer Vorbildfunktion und andererseits den in verschiedenen kommunalen Konzepten, Programmen und Plänen festgelegten Zielen zum

Ausbau von PV mit den o. g. weiteren Annahmen zur Potenzialhebung und den jährlichen Zubauraten konsequent folgen (Szenario 2), so würde bis zum Jahr 2039 dieses Potenzial erschlossen werden und inklusive des Zubaus der anderen Eigentümergruppen nach Szenario 1 gut 121.000 kWp PV-Leistung gehoben werden können. Dies entspräche knapp 13% des im Solardachkataster erfassten Gesamtpotenzials. In den einzelnen Stadtbezirken würden so zwischen 9,6% (Stadtbezirk Ost) und 19,2% (Stadtbezirk Süd) des jeweiligen Potenzials gehoben werden können. Die jährlichen Zubauraten würden dann von ca. 5.000 kWp im Jahr 2023 auf gut 13.600 kWp im Jahr 2036 steigen, wobei aufgrund von Sättigungseffekten nur bis zum Jahr 2030 in allen Stadtbezirken ein Zubau erfolgen würde, weshalb der Wert für 2031 rückläufig ist. Hier wäre dann im Großteil der Stadtbezirke das angenommene hebbare Potenzial erschlossen und nur noch ein geringer Zubau bis zur vollständigen Potenzialhebung im Jahr 2039 in wenigen Stadtbezirken möglich.

Die Eigentümergruppe mit dem größten Potenzial stellt die in sich sehr heterogene Gruppe der privaten Eigentümer dar. Wird dem Szenario 3 entsprechend unterstellt, dass sich die Stadt darauf konzentriert, durch verschiedene Maßnahmen gezielt dieses Potenzial zur Hälfte zu heben und der angenommene jährliche Zubau daraufhin erfolgt, so würde bis 2048 dieses Potenzial gehoben. Mit dem Zubau der anderen Akteursgruppen (auch Stadt und kommunale Unternehmen) wären dies gut 364.000 kWp, was einem Anteil von 38% entspricht. Dabei würden in den Stadtbezirken zwischen 31,0% (Mitte) und 44,1% (Nordwest) des jeweiligen Potenzials gehoben werden, wobei in der überwiegenden Mehrzahl der Stadtbezirke der Wert zwischen etwa 41 bis 43 Prozent liegt. Die jährlich neu installierte PV-Leistung würde dabei von ca. 11.000 kWp im Jahr 2023 auf knapp 20.000 kWp im Jahr 2032 steigen. Danach wären in einigen Stadtbezirken die Potenziale entsprechend des Szenarios gehoben, weshalb 2033 ein leichter Rückgang erfolgt. Bis zum Jahr 2039 wäre das Potenzial überwiegend und bis zum Jahr 2048 vollständig gehoben.

Schließlich wird in Szenario 4 das entsprechende Potenzial PV-Leistung i. H. v. ca. 482.500 kWp bis 2050 gehoben, was gut 50% des Gesamtpotenzials nach Solardachkataster entspräche. In den Stadtbezirken würden damit zwischen 50,1% (Mitte) und 81,7% (Süd) des jeweiligen Potenzials gehoben werden können. Mit einer Ausnahme würde dieser Wert in allen Stadtbezirken zwischen 50 und 54% liegen. Die jährlichen Zubauraten würden von

knapp 6.250 kWp im Jahr 2023 auf gut 25.000 kWp im Jahr 2032 steigen. Danach würde der weitere Zubau nicht mehr in allen Stadtbezirken erfolgen. Der überwiegende Teil des nach diesem Szenario hebbaren Potenzials würde bis 2039 erschlossen. Bis 2050 würde in einigen Stadtteilen das verbleibende restliche Potenzial gehoben.

Handlungsoptionen von Kommunen zur Potenzialhebung

Wie die Beispielszenarien zeigen, kann bei einer aktiven Steuerungsstrategie der Stadt zur Beeinflussung des Verhaltens v. a. der privaten Gebäudeeigentümer ein enormes Energiepotenzial aus PV-Anlagen gehoben werden. Je nachdem, ob und wie eine entsprechende Strategie verfolgt wird und wie erfolgreich diese verläuft, kann dies in sehr unterschiedlichen Zeiträumen erfolgen. So zeigt Abbildung 5.2 bspw. für den privaten Gebäudebestand verschiedene Zeithorizonte bis zur Hebung des theoretisch zubaubaren PV-Potenzials nach Solardachkataster. Würde es gelingen, durch entsprechende Anreize und Maßnahmen der Stadt, aber auch der anderen staatlichen Ebenen, den auf dem MaStR basierenden Zubau für 2021 jährlich um 20% zu steigern, so würde das im Solardachkataster ermittelte Potenzial bezogen auf die Gesamtstadt bis 2040 gehoben werden können. Bei einer jährlichen Steigerungsrate von 5% (10%/15%) wäre dies im Jahr 2065 (2051/2044) der Fall.

Jedoch erscheint eine vollständige Hebung des im Solardachkataster ausgewiesenen theoretischen Potenzials von 960.000 kWp oder 960 MWp, was leicht über der Bruttoleistung eines der beiden Kraftwerksblöcke des Kraftwerks Lippendorf (920 MW_{el}) liegt, aus mehreren Gründen schwierig bzw. fraglich. Unabhängig der technologischen Entwicklung und des gesetzlichen Rahmens zur Förderung des Ausbaus erneuerbarer Energien wurden nach MaStR seit 2000 durch PV-Kleinanlagen eine Leistung von ca. 55 MWp installiert. Über einen Zeitraum von gut 20 Jahren wurde folglich nur ein Bruchteil dieses Potenzials gehoben. Daher ist die Frage zu beantworten, welcher Zielwert zukünftig auf Grundlage verschiedener Nebenbedingungen wie Kapazität des Stromnetzes, technologische Entwicklungen (Effizienz und Leistungsfähigkeit von PV-Kleinanlagen), Verfügbarkeit und Lieferzeiten von Anlagen, Planungs- und Umsetzungszeitraum für die Installation entsprechender Anlagen oder Kapazitäten

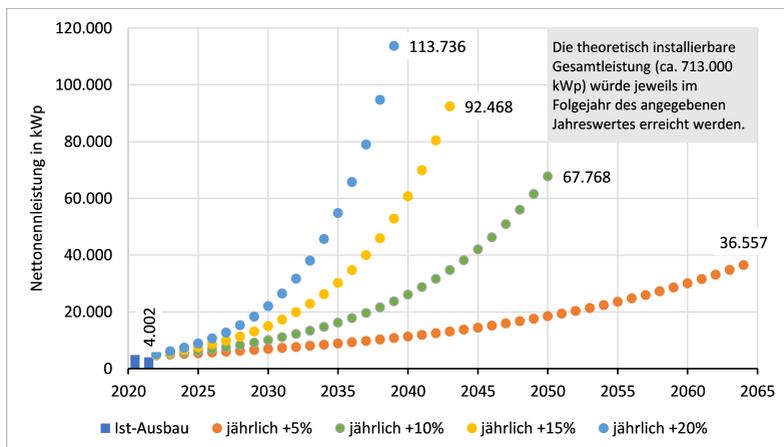


Abbildung 5.2.: Zubaupfade der auf privaten Gebäuden installierbaren PV-Leistung (kWp) nach unterschiedlichen jährlichen Steigerungsraten zum Vorjahr (Szenario 3). Eigene Darstellung und Berechnung, Datengrundlage: Stadt Leipzig 2010 und Bundesnetzagentur 2021.

entsprechender Firmen, aber auch aufgrund des Sachverhalts, dass die Grundlage und detaillierte Vorgehensweise bei der Potenzialberechnung des Solardachkatasters nicht vorgelegen hat, realistisch erscheint. Mithin ist ggf. die Hälfte des errechneten Potenzials – dann aber nicht bezogen auf den als geeignet eingeschätzten Gebäudebestand zum Zeitpunkt der Erstellung des Solardachkatasters (2010), sondern auf den aktuellen Gesamtgebäudebestand (auch derzeit aufgrund des baulichen Zustands nicht nutzbarer Gebäude) und dessen zukünftiger Entwicklung – eine realistischere Zielmarke.

Neben der Frage, welches Potenzial realistisch erschlossen werden kann, ist dann von Interesse, wie der entsprechende Ausbaupfad erfolgen kann. Wie bereits erwähnt, stellen die hier dargestellten Szenarien eine sehr stark vereinfachte Sichtweise dar, da auch hier eine Vielzahl an Restriktionen gegeben waren. So waren einerseits die Daten des Solardachkatasters lückenhaft (bspw. fehlende Adressdaten), auch wurden dort nur gut die Hälfte

des Gebäudebestands erfasst.² Auch ist hier relevant, wer Eigentümer der Gebäude ist. Diese Information erfolgte durch Verschneidung der Eigentümerdaten nach Flurstücken und der Daten zum Gesamtgebäudebestand mit dem Solardachkataster. Aufgrund unterschiedlicher Bezugsgrößen (Flurstück vs. Gebäude) konnte einerseits keine exakte Eigentümerstruktur des Gebäudebestandes abgeleitet werden, andererseits konnten nicht alle Gebäude einer Eigentümergruppe zugeordnet werden. Schließlich wurde bereits darauf hingewiesen, dass einige Eigentümergruppen in sich sehr heterogen sind, was wiederum bezogen auf die Zielgenauigkeit und zeitlichen Verlauf der Wirkung etwaiger Maßnahmen seitens der Stadt kritisch und fehleranfällig ist. Schließlich ist zu fragen, welche technischen Grenzen bzw. Restriktionen besonders bei einer hohen jährlichen Zubaurate von PV-Kleinanlagen gesetzt sind (bspw. Netzkapazitäten, Netzstabilität, Sicherstellung Grundlast etc.).

Fazit und Ausblick

Wie die vorangegangenen numerischen Betrachtungen gezeigt haben, besteht in der exemplarisch betrachteten Stadt Leipzig ein erhebliches Ausbaupotential in Bezug auf die Nutzung von PV-Kleinanlagen. Zusammengefasst ergeben sich in Bezug auf einen umfassenden Ausbau kommunaler PV-Anlagen erhebliche Herausforderungen, die wie folgt charakterisiert werden können:

1. Da der in der Vergangenheit beobachtete Ausbau das vorhandene Potential bei weitem nicht ausschöpft, stellt sich aus Klimaschutzgründen die Frage, mit welchen kommunalen Instrumenten der Ausbau von PV-Kleinanlagen beschleunigt werden könnte.
2. Gleichzeitig stellt sich aufgrund der erheblichen Dimension des potentiellen Ausbaus die in diesem Sammelband in weiteren Kapiteln detailliert betrachtete Frage, was dazu führt, dass manche Akteure sich für die Installation einer PV-Aufdachanlage entscheiden und andere diesbezüglich zurückhaltend sind (vgl. Kapitel zu „Modellierung von haushaltsseitigen Entscheidungsprozessen zur Adoption von Aufdach-Photovoltaikanlagen“).

²Da dort nur Gebäude mit einer Mindesteignung zum Zeitpunkt 2010 erfasst wurden, kann das Potenzial nach heutiger Maßgabe über dem dort ausgewiesenen Potenzial liegen.

3. Aus der Sicht der kommunalen Energieversorger stellt sich darüber hinaus die existenzbetreffende Frage, in welcher Geschwindigkeit diese Unternehmen auf neue Geschäftsmodelle (z.B. im Bereich der Nutzung erneuerbarer Energien oder der Umsetzung von dezentralen Maßnahmen zur Förderung der Energieeffizienz) setzen sollen, die (wie das Beispiel dezentraler PV-Aufdachanlagen zeigt) zumindest kurzfristig negative Auswirkungen auf ihr klassisches Kerngeschäft (den Vertrieb von Strom und in anderen Kontexten den von Gas und Fernwärme) erwarten lassen.

Insbesondere die Flexibilität einer schnell steigenden Anzahl von Prosumenten (d.h. Stromnachfrager, die z.B. mit Hilfe von Photovoltaikanlagen dezentral Strom erzeugen, um diesen zu verbrauchen, zeitweise zu speichern, oder ins Netz einzuspeisen) stellt darüber hinaus eine wachsende Herausforderung für die Infrastrukturplanung dar, die bisher noch nicht angemessen adressiert werden kann. Die weiteren Kapitel des hier vorliegenden Sammelbandes stellen sich dieser Herausforderung und zeigen auf, wie es mit Hilfe der Entwicklung geeigneter agentenbasierter Computermodelle gelingen kann, den Erfolg, die Co-Benefits und die Risiken zu bewerten, die mit der Umsetzung von Vorhaben zur energetischen Transformation urbaner und regionaler Räume verbunden sind.

Danksagung

Dieser Beitrag wurde finanziert durch das Projekt „Smart Utilities and Sustainable Infrastructure Change“ (Antragsnummer 100378087 (SAB)).

Diese Maßnahme wird mitfinanziert durch Steuermittel auf der Grundlage des vom Sächsischen Landtag beschlossenen Haushaltes.



DOI: <https://doi.org/10.30819/5413.05>

Regionalwirtschaftliche Wertschöpfungseffekte aus dem Betrieb von Photovoltaikanlagen innerhalb einer Kommune

Maren Springsklee¹, Katharina Kolb¹, Mario Hesse¹, Thomas Lenk¹

Highlights

- Das Kapitel geht der Frage nach, wie sich direkte, indirekte und induzierte Wertschöpfungseffekte durch den Betrieb von PV-Anlagen auf kommunaler Ebene quantifizieren lassen.
- Die Methodik erweitert bestehende Ansätze um aktuelle regulatorische Rahmenbedingungen, die gestiegene Bedeutung des Eigenverbrauchs und die Nutzung einer realitätsnahen vergütungsseitigen Datenquelle.
- In der Beispielkommune Leipzig generierte der PV-Betrieb im Jahr 2019 insgesamt eine Wertschöpfung von rund 9 Mio. €, wovon ca. 4,2 Mio. € lokal gebunden werden konnten.
- Das minimale und maximale Potenzial schwankt bei kleinen Anlagen deutlich weniger um den errechneten Wert für 2019 als bei großen Anlagen, die sich vermehrt in der Hand ortsfremder Betreibergesellschaften befinden.

¹Institut für Öffentliche Finanzen und Public Management, Universität Leipzig

Einleitung

Der voranschreitende Ausbau erneuerbarer Energien (EE) bringt eine zunehmend dezentralisierte Energieproduktion mit sich. Dies wirkt sich nicht nur auf technische Voraussetzungen, wie die Gewährleistung der Versorgungssicherheit oder Netzstabilität aus, sondern kann auch erhebliche regionalwirtschaftliche Effekte hervorrufen. Kommunalpolitik und -verwaltung können die vor Ort generierte Wertschöpfung als Entscheidungsbasis nutzen, um geeignete Instrumente zur Unterstützung des EE-Ausbaus und des Klimaschutzes auszuwählen. Hierfür wurde im Rahmen des Projektes 'Smart Utilities and Sustainable Infrastructure Change' (SUSIC) eine allgemeine Methodik zur Bestimmung der direkten, indirekten und induzierten Wertschöpfungseffekte durch den Betrieb von Photovoltaik (PV)-Anlagen erarbeitet. Dabei wird der geschaffene Mehrwert entlang der Wertschöpfungskette quantifiziert und derjenige Anteil abgegrenzt, der in der Kommune verbleibt. Das Kapitel gibt einen Kurzüberblick zur Methodik der Wertschöpfungsanalyse² und stellt die gesamte sowie kommunal verbleibende Wertschöpfung dar, die aus dem PV-Betrieb in der Beispielkommune Stadt Leipzig im Jahr 2019 resultiert. Die (weiter-)entwickelte Methodik berücksichtigt neben aktuellen regulatorischen Rahmenbedingungen auch eine neue Datenquelle und ermöglicht damit eine realitätsnähere Abbildung der Wertschöpfungseffekte.

Methodik

Der gesamte Wertschöpfungseffekt aus dem Betrieb von PV-Anlagen setzt sich aus den *direkten*, *indirekten* und *induzierten* Wertschöpfungseffekten zusammen. Zur Bestimmung der direkten Wertschöpfungseffekte knüpft die Methodik an der Logik der Verteilungsrechnung der volkswirtschaftlichen Gesamtrechnung an, indem die Einkommensanteile der beteiligten Stakeholder (Einkommensanteile der Eigenkapitalgeber:innen, Steuereinnahmen des Staates, Zinseinnahmen der Fremdkapitalgeber:innen) addiert werden.³ Zusätzlich löst der PV-Betrieb indirekte Wertschöpfungseffekte durch die

²Für eine ausführliche Beschreibung der Methodik siehe Kolb u. a., 2021.

³Vgl. Haller, 1997, S. 43 f.; BMVBS, 2013, S. 19-21. Aufgrund des geringen Personalaufwands im PV-Betrieb, wird der Arbeitnehmer:innenanteil nur indirekt einbezogen.

Nachfrage in den relevanten Vorleistungsbetrieben aus, beispielsweise durch die Inanspruchnahme von Dienstleistungen wie Anlagenwartung oder Steuerberatung. Zuletzt verursacht die Wiederverausgabung des entstandenen Einkommens Multiplikatoreffekte auf die gesamtwirtschaftliche Nachfrage – den sogenannten induzierten Effekt.⁴ Für die kommunalen Entscheidungsträger:innen ist jedoch oftmals weniger die gesamte Wertschöpfung, sondern vielmehr der vor Ort *in der Kommune geschaffene und verbleibende* wirtschaftliche Mehrwert ausschlaggebend. Zur kommunalen Abgrenzung der Wertschöpfungseffekte werden daher für jeden Wertschöpfungsschritt Fragen nach der räumlichen Zuordnung der Stakeholder, Zulieferbetriebe etc. beantwortet.

Datengrundlage und Annahmen der Wertschöpfungsanalyse

Die Berechnungsmethodik der drei Wertschöpfungseffekte baut auf verschiedenen Studien auf, die sich explizit mit Wertschöpfung durch regenerative Stromerzeugung und insbesondere Solarstrom auf kommunaler Ebene befassen.⁵ Die Methodik wird einerseits dahingehend erweitert, dass veränderte regulatorische Rahmenbedingungen einbezogen werden, so zum Beispiel die zunehmende Bedeutung des Eigenverbrauchs. Andererseits ermöglicht eine zuletzt verbesserte Datenverfügbarkeit die realitätsnahe Abbildung der Anlagen- und Vergütungsstrukturen in der Beispielkommune.⁶ Die direkten, indirekten und induzierten Wertschöpfungseffekte werden sukzessive pro kWp installierter Leistung und Jahr quantifiziert und anschließend auf die in der Kommune insgesamt installierte Leistung hochgerechnet. Die Berechnung erfolgt separat für vier Größenklassen (GK), um Unterschiede in der Vergütungs- und Kostenstruktur verschiedener Anlagengrößen zu berücksichtigen. Anlagen in GK I (≤ 10 kWp) lassen sich dabei typischerweise als kleine Dachanlagen auf Ein- und Mehrfamilienhäusern charakterisieren, während Anlagen in GK II (10-100 kWp) und

⁴Vgl. ebd., S. 23; Jenniches und Schneider, 2017, S. 21.

⁵Dazu zählen die von Hirschl u. a., 2010; Kosfeld und Gückelhorn, 2012; BMVBS, 2013; Jenniches und Schneider, 2017 entwickelten Näherungsverfahren, die einen ähnlichen inhaltlichen und räumlichen Zuschnitt haben.

⁶Als Datengrundlage dienen zwei komplementäre Datenquellen. Im Marktstammdatenregister (MaStR) der Bundesnetzagentur sind Stammdaten der Anlagen und ihrer Betreiber:innen aufgeführt, vgl. Bundesnetzagentur, o. J. Die Jahresabrechnung des Übertragungsnetzbetreibers 50Hertz enthält anlagenspezifisch die eingespeiste Strommenge sowie die EEG-Vergütungszahlungen, vgl. 50Hertz, 2020a; 50Hertz, 2020b.

GK III (100-750 kWp) oftmals mittlere bis große Dachanlagen auf größeren Gebäuden abbilden und sich in GK IV (> 750 kWp) vor allem weitläufige Freiflächenanlagen und sehr große Dachanlagen (z. B. auf Fertigungshallen) vorfinden.

Die Mehrzahl der installierten Anlagen in der Stadt Leipzig fällt in GK I (> 1.700 Anlagen, Stichtag 01.01.2019). Allerdings dominiert GK IV sowohl bei der kumulierten installierten Leistung (ca. 33.300 kWp) als auch bei der insgesamt eingespeisten Strommenge (ca. 34.700 MWh im Jahr 2019).⁷ Im Zeitverlauf zeigt sich in GK I bis III ab 2009 ein relativ konstanter jährlicher Zuwachs von durchschnittlich rund 880 kWp pro Jahr. In GK IV steigt die installierte Leistung zwischen 2010 und 2013 am stärksten an. Die Betreiber:innen von PV-Anlagen setzen sich sowohl aus Privatpersonen als auch aus Unternehmen zusammen. In der Stadt Leipzig werden 94% der kleinen Dachanlagen (GK I) von Privatpersonen betrieben, während die größten Dachanlagen (GK IV) ausschließlich in der Hand gewerblicher Unternehmen sind. Zudem lässt sich beobachten, dass die Anzahl der Betreibergesellschaften, die in Leipzig ansässig sind, über die Größenklassen hinweg abnimmt. So haben 90% der Betreibergesellschaften mit Anlagen in GK I ihren Sitz in der Stadt Leipzig, während sich Anlagen in GK IV ausschließlich in der Hand ortsfremder Betriebe befinden.⁸

Berechnung des direkten Wertschöpfungseffekts

Der *direkte Wertschöpfungseffekt* entspricht der Summe der Einkommensanteile der drei Stakeholder, der aus dem Betrieb von PV-Anlagen und der wirtschaftlichen Nutzung des generierten Stroms erwächst. Den Betreiber:innen, die das Eigenkapital stellen, verbleibt dabei der Nachsteuergewinn – also der Vorsteuergewinn abzüglich ihrer Steuerlast. Die anfallenden Steuerzahlungen stellen wiederum den staatlichen Einkommensanteil dar. Der Anteil der Fremdkapitalgeber:innen am direkten Wertschöpfungseffekt entspricht den Zinszahlungen der Betreiber:innen. Nur ein Teil der

⁷In GK I bis III liegt die kumulierte installierte Leistung im Jahr 2019 jeweils zwischen 9.000 und 10.000 kWp, die eingespeiste Strommenge zwischen 7.000 und 8.700 MWh.

⁸Bei Privatpersonen stehen aufgrund des Datenschutzes keine Angaben zum Wohnort zur Verfügung. Da es sich bei diesen jedoch überwiegend um kleine Anlagen auf Ein- und Mehrfamilienhäusern handelt, wird angenommen, dass der Wohnsitz der Betreiber:innen dem Anlagenstandort entspricht.

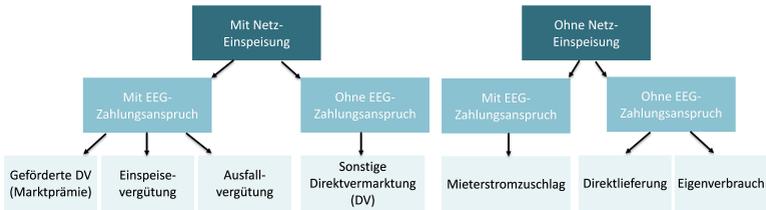


Abbildung 6.1.: Veräußerungsformen von EE-Strom nach dem EEG 2021. Eigene Darstellung in Anlehnung an Klobasa u. a., 2018 S. 5.

genannten Stakeholderanteile verbleibt jedoch in der Standortkommune. Dieser kommunal verbleibende Anteil wird in der vorliegenden Wertschöpfungsanalyse für jeden Stakeholder spezifisch beziffert, d. h., es wird eine konkrete örtliche Abgrenzung vorgenommen.

Als Ausgangspunkt werden zunächst der durchschnittliche jährliche Umsatz sowie die im Betrieb einer PV-Anlage anfallenden Kosten in den verschiedenen Größenklassen pro kWp ermittelt und saldiert, um den Vorsteuergewinn zu erhalten. Der Umsatz einer PV-Anlage hängt neben dem Stromertrag auch vom Vermarktungsmodell ab. Grundsätzlich stehen Betreiber:innen verschiedene Vermarktungsmodelle mit und ohne Zahlungsanspruch nach dem Erneuerbare-Energien-Gesetz (EEG) offen (siehe Abbildung 6.1).⁹ Der erzeugte Strom kann entweder ins Netz eingespeist, in nächster Umgebung direkt geliefert, oder selbst verbraucht werden. Insbesondere der Eigenverbrauch ist über die letzten Jahre zunehmend rentabler geworden, da die Einspeisevergütung kontinuierlich gesunken und die Strompreise für Endkund:innen angestiegen sind.¹⁰ Für Betreiber:innen lohnt sich Eigenverbrauch, wenn der Strompreis oberhalb der Stromerzeugungskosten ihrer Anlage liegt. Während sich die EEG-Vergütung aus den Daten der Jahresabrechnung des Übertragungsnetzbetreibers ergibt, wird die eigenverbrauchte Strommenge näherungsweise selbst bestimmt. Hierzu wird die durchschnittliche jährliche Strommenge der PV-Anlagen je GK berechnet und anschließend die durchschnittliche eingespeiste Strommenge

⁹Hier werden nur Vermarktungsmodelle mit EEG-Zahlungsanspruch betrachtet, zu denen die 50Hertz-Bewegungsdaten vorliegen (Einspeisevergütung, Marktprämienmodell mit/ohne Ausschreibung, vermiedene Netzentgelte), sowie der Eigenverbrauch.

¹⁰Vgl. 50Hertz u.a., 2021; Bundesnetzagentur und Bundeskartellamt, 2021, S. 284.

je GK abgezogen. Das Residuum entspricht der eigenverbrauchten Strommenge. Multipliziert mit dem durchschnittlichen Strompreis berechnet sich die Einsparung der Anlagenbetreiber:innen durch den Eigenverbrauch des selbsterzeugten Stroms im Vergleich zum Fremdbezug, z. B. über die Stadtwerke.

Die im PV-Betrieb anfallenden Kosten lassen sich in Betriebskosten, wie z. B. für Wartung und Instandhaltung, Versicherung oder Pacht, sowie Finanzierungskosten und Abschreibungen unterteilen. Die Quantifizierung erfolgt teils prozentual in Abhängigkeit der Investitionskosten¹¹, teils in Absolutgrößen, und basiert auf Werten der Vergleichsstudien sowie zusätzlichen Recherchen. Tabelle 6.1 gibt einen Überblick über die einzelnen Umsatz- und Kostenkomponenten je Größenklasse. Zudem ist der gesamte sowie kommunal verbleibende Anteil der drei Stakeholder aufgeführt.

Für die öffentlichen Haushalte ist vor allem das Steueraufkommen als direkte Einnahme relevant. Im PV-Betrieb fallen je nach Rechtsform der Betreiber:innen u. a. Einkommen-, Gewerbe- und Körperschaftsteuer sowie der Solidaritätszuschlag an. Subtrahiert man diese Steuerlast vom Vorsteuergewinn, ergibt sich mit dem Nachsteuergewinn der direkte *Wertschöpfungsanteil der Betreiber:innen* (=Eigenkapitalgeber:innen). Davon verbleibt jedoch lediglich ein Teil in der Standortkommune, welcher über den Anteil der vor Ort ansässigen Privatpersonen und Organisationen in der jeweiligen Größenklasse angenähert werden kann. Da in GK IV alle Betreiber:innen außerhalb der Stadt Leipzig sitzen, fließt die gesamte direkte Wertschöpfung der Eigenkapitalgeber:innen in dieser Größenklasse ab. In GK I verbleibt aufgrund der hohen Ortsansässigkeit der größte Teil.

Die Steuerzahlungen entsprechen dem fiskalischen Effekt, also dem *staatlichen Anteil* an der direkten Wertschöpfung. Das Aufkommen der aufgeführten Steuern lässt sich räumlich zuordnen, wobei es durch die Steuer- verteilung zwischen Bund, Ländern und Gemeinden¹² nicht gänzlich auf der kommunalen Ebene verbleibt. So fließen die Körperschaftsteuer und der Solidaritätszuschlag vollständig an die übergeordneten Ebenen. Die Einkommensteuer steht lediglich zu 15% der Wohnsitzgemeinde der Steu-

¹¹Die Investitionskosten wurden je GK auf Basis von Fraunhofer ISE und PSE Projects, 2020, für den Zeitraum 2000-2018 zurückgeschrieben. Siehe Kolb u. a., 2021, S. 32-34.

¹²Zum System der Steuerverteilung zwischen den föderalen Ebenen siehe z. B. Lenk und Glinka, 2017.

Tabelle 6.1.: Zusammensetzung des durchschnittlichen jährlichen Nachsteuergewinns je Größenklasse in €/kWp für die Beispielkommune Stadt Leipzig (2019). Eigene Berechnung.

In €/kWp	GK I	GK II	GK III	GK IV
	≤10 kWp	10-100 kWp	100-750 kWp	>750 kWp
EEG-Vergütung	198	228	172	192
+ Vorteilhaftigkeit Eigenverbrauch	115	68	66	26
=Umsatz	313	296	238	218
- Betriebskosten	34,9	49,2	52,7	47,9
Wartung und Instandhaltung	25,3	24,3	23,3	22,7
Zählermiete	4,8	1,7	0,1	0,01
Versicherung	4,8	4,1	3,5	2,6
Pacht	-	-	1,8	2,1
Steuerberatung	-	5	3,3	3,3
Verwaltung und sonstige Betriebskosten	-	6,9	13,1	13,0
EEG-Umlage auf eigenverbrauchten Strom	-	7,2	7,6	4,2
- Finanzierungskosten (≙ Anteil Fremdkapital)	54,8	53,0	45,4	29,7
<i>Davon kommunal verbleibend</i>	28,5	27,5	23,6	15,5
- Abschreibungen	121,0	102,2	88,2	65,7
=Vorsteuergewinn	102,3	91,6	51,7	74,7
- Steuerlast (≙ Anteil des Staates)	34,2	24,7	13,6	24,6
Einkommensteuer	32,2	20,2	9,1	5,1
Solidaritätszuschlag	1,8	1,3	0,6	0,7
Gewerbsteuer	-	-	1,2	11,6
Körperschaftsteuer	0,2	3,2	2,7	7,2
<i>Davon kommunal verbleibend</i>	4,8	2,6	1,5	1,8
=Nachsteuergewinn (≙ Anteil Eigenkapital)	68,1	66,9	38,1	50,1
<i>Davon kommunal verbleibend</i>	68,0	58,8	18,4	0

erpflichtigen zu.¹³ Die Gewerbesteuer verbleibt hingegen fast vollständig in der Kommune, wobei bei Betrieben mit mehreren Betriebsstätten das Gewerbesteueraufkommen zerlegt wird. Für Betriebe, die ausschließlich Wind- und Solarstrom erzeugen, wurde der Zerlegungsmaßstab in den letzten Jahren wiederholt geändert. Im Betrachtungsjahr 2019 galt für Anlagen mit Inbetriebnahme ab Juli 2013 die sogenannte *70:30-Regel*, wonach vereinfacht gesagt, 70% der Gewerbesteuer auf die Standortgemeinde der Anlage entfallen und 30% der Gemeinde mit Verwaltungssitz der Betreiber-gesellschaft zustehen. Das Gewerbesteueraufkommen von Anlagen, welche vor diesem Zeitpunkt installiert worden sind, wird weiterhin nach dem Standardschlüssel der Lohnsummen zerlegt.¹⁴ Somit fließt ein Großteil

¹³Vgl. Art. 106 Abs. 3 S. 2 GG.

¹⁴Vgl. § 29 Abs. 1 Nr. 2 GewStG a.F.

des Aufkommens älterer Anlagen aus der Standortkommune ab, da der laufende Betrieb einer PV-Anlage keinen bzw. kaum dauerhaften Personaleinsatz vor Ort erfordert. Während der gemeindliche Steueranteil bei der Einkommensteuer in GK I und II am höchsten ist, spielt die Gewerbesteuer lediglich in GK III und IV eine Rolle. Hierbei ist anzumerken, dass vor dem Hintergrund der oben genannten Zerlegungsschlüssel die Ortsansässigkeit der gewerblichen Betreiber:innen das vor Ort verbleibende Gewerbesteueraufkommen derzeit noch maßgeblich beeinflusst. Dies wird aufgrund der 2021 eingeführten sogenannten *90:10-Regel* in der Zukunft weniger stark der Fall sein.¹⁵

Zuletzt verbleibt der *Anteil der Fremdkapitalgeber:innen* am direkten Wertschöpfungseffekt. Dieser entspricht den Zinszahlungen, welche die Betreiber:innen leisten müssen. Zur kommunalen Abgrenzung wird eine Regionalisierungsquote von 52% angesetzt und darüber der in der Stadt Leipzig verbleibende Anteil der Zinseinnahmen angenähert.¹⁶ Insgesamt ergeben sich abfallende Fremdfinanzierungskosten je kWp. Zwar ist für kleinere Anlagen von einem niedrigeren Fremdfinanzierungsanteil auszugehen. Die Kreditkonditionen sind jedoch für Unternehmen im Vergleich zu Privatpersonen i. d. R. günstiger. Zudem nehmen die Investitionskosten je kWp aufgrund von Skaleneffekten über die Größenklassen hinweg ab.

Berechnung des indirekten und induzierten Wertschöpfungseffekts

Neben den direkten Wertschöpfungseffekten entstehen auch *indirekte Effekte* durch die Nachfrage in Vorleistungs- und Zulieferbetrieben.¹⁷ Dabei entsprechen die Betriebskosten der Anlagenbetreiber:innen den Umsätzen der jeweiligen Vorleistungsbetriebe. Die Wertschöpfungsquote wird aus Gründen der Vereinfachung näherungsweise für (verwandte) Wirtschaftszweige aus der amtlichen Statistik abgeleitet. Da nicht alle Vorleistungsbetriebe ortsansässig sind und ein Teil der indirekten Wertschöpfung somit aus der

¹⁵Vgl. § 29 Abs. 1 Nr. 2 GewStG.

¹⁶Vgl. Kolb u. a., 2021, S. 44-45. Die näherungsweise Berechnung erfolgt analog zu BMVBS, 2013 über den Anteil der lokalen Buchkredite von öffentlich-rechtlichen Kreditinstituten, Regional- und Genossenschaftsbanken am gesamten Buchkreditgeschäft.

¹⁷Vgl. ebd., S. 23 f.; Jenniches und Schneider, 2017, S. 21.

Kommune abfließt, wird der kommunal verbleibende Anteil über Regionalisierungsquoten bestimmt. Diese werden aufgrund der unzureichenden Datenlage unter Berücksichtigung der Größenklasse, lokalen Wirtschaftsstruktur und Art der Vorleistung geschätzt.¹⁸

Außerdem löst die Wiederverausgabung des Einkommens, welches durch den PV-Betrieb generiert wird, einen Anstieg der gesamtwirtschaftlichen Nachfrage aus. Dieser *induzierte Effekt* wird technisch durch die Multiplikation der kommunal verbleibenden direkten und indirekten Effekte mit einem regionalspezifischen Einkommensmultiplikator berechnet. Dieser wird für die Stadt Leipzig näherungsweise mithilfe der gängigen Formel bestimmt und liegt bei 1,497.¹⁹ Jeder Euro Einkommen, der durch den PV-Betrieb direkt oder indirekt erzeugt wird, induziert vor Ort demnach eine zusätzliche Wertschöpfung in Höhe von rund 49,7 ct.

Kommunale Wertschöpfung in der Stadt Leipzig (2019)

Die gesamte durchschnittliche Wertschöpfung ergibt sich aus der Summe der direkten, indirekten und induzierten Wertschöpfungseffekte. Durch den Betrieb von PV-Anlagen in Leipzig wurden im Jahr 2019 durchschnittliche Wertschöpfungseffekte zwischen 134 €/kWp und 226 €/kWp erzeugt (siehe Abbildung 6.2). Hiervon fließt jeweils ein Teil aus der Stadt Leipzig ab – lediglich der eingefärbte Teil der Balken verbleibt vor Ort. Sowohl der Gesamteffekt als auch die kommunal verbleibende Wertschöpfung verläuft dabei von Größenklasse I bis IV regressiv. Kleinere Anlagen können folglich pro kWp mehr Wertschöpfung erzeugen und vor Ort binden, als dies bei gewerblich betriebenen Anlagen, z. B. in Form von Investorenmodellen, möglich ist. Verbleiben in GK I noch 64% der direkten und 76% der indirekten Wertschöpfung in der Kommune, sind es in GK III nur noch 45% bzw. 50%. In GK IV kann lediglich 16% der direkten Wertschöpfung und 37% der indirekten Wertschöpfung in der Kommune gehalten werden. Es wird deutlich, dass sich die in der Kommune gebundene Wertschöpfung überwiegend aus dem direkten und induzierten Effekt speist, während der indirekte Effekt (Vorleistungsebene) eine vergleichsweise geringe Rolle spielt.

¹⁸Vgl. Kolb u. a., 2021, S. 54-58.

¹⁹Vgl. ebd., S. 59-62.

Regionale Wertschöpfung Photovoltaik

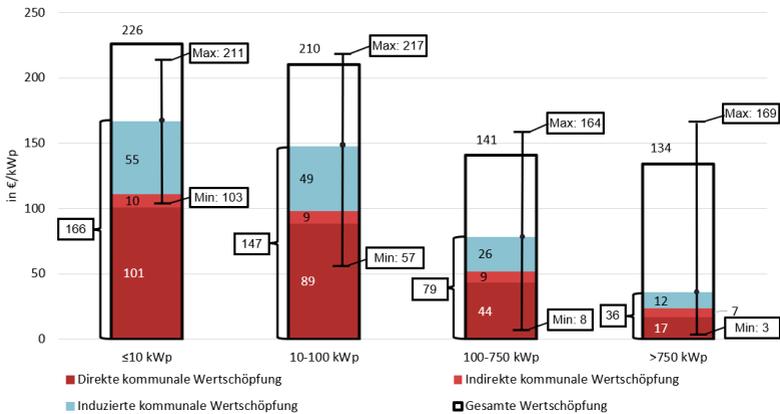


Abbildung 6.2.: Durchschnittliche kommunale Wertschöpfung in der Stadt Leipzig in €/kWp (2019). Eigene Darstellung; eigene Berechnung.

Die Ortsansässigkeit der Betreiber:innen sowie der Grad der regionalen Verflechtung mit den relevanten Vorleistungsbetrieben haben einen wesentlichen Einfluss auf den Anteil der kommunal verbleibenden Wertschöpfung. Zugleich lassen sich einige der relevanten Parameter nicht präzise berechnen. Stattdessen müssen in der Methodik an verschiedenen Stellen Annahmen getroffen und Abschätzungen vorgenommen werden. Mithilfe einer Sensitivitätsanalyse lässt sich der Rahmen abstecken, in dem sich die kommunale Wertschöpfung bewegen kann. Dabei entspricht das maximale Wertschöpfungspotenzial einem Szenario, in welchem die Kommune sämtliche relevante (Vor-)Leistungen vor Ort bündelt und zudem alle Anlagenbetreiber:innen im Sinne einer lokal organisierten Energiewende ortsansässig sind. Das minimale Potenzial skizziert die Gegenvariante, in welcher der PV-Betrieb ausschließlich durch ortsfremde Akteur:innen durchgeführt und organisiert und letztlich nur die Fläche lokal bereitgestellt wird. Werden die Potenziale mit der hier errechneten Wertschöpfung verglichen, so schwankt die kommunale Wertschöpfung bei kleinen Anlagen (Min: 103 €/kWp; Max: 211 €/kWp) durch die vielen ortsansässigen Privatpersonen deutlich weniger um den errechneten Wert für 2019 (166 €/kWp), als bei den großen Anlagen, die sich vermehrt in der Hand externer Betreiber:innen befinden. Durch die induzierten Effekte

kann bei einem lokal gebündelt organisierten PV-Betrieb sogar zum Teil ein höherer Gesamteffekt generiert werden als durch die Stromerzeugung selbst.

Die Ergebnisse der Wertschöpfungsanalyse werden mit der tatsächlich installierten Leistung pro Größenklasse in Leipzig hochgerechnet, um die insgesamt generierte Wertschöpfung zu bestimmen. In Bezug auf GK IV ist insbesondere interessant, dass in dieser mit Abstand die höchste Wertschöpfung (ca. 4,5 Mio. €) generiert wird, da die vergleichsweise kleinen Effekte je kWp durch die schiere Größe der installierten Anlagenleistung kompensiert werden. Insgesamt konnte im Jahr 2019 eine Wertschöpfung in Höhe von rund 4,2 Mio. € durch den PV-Betrieb in der Stadt Leipzig gebunden werden. Dabei handelt es sich allerdings um weniger als die Hälfte der insgesamt erzeugten Wertschöpfung in Höhe von rund 9 Mio. € – ca. 4,8 Mio. € fließen ab. Dieser vergleichsweise hohe Anteil (53%) ist zum Großteil darauf zurückzuführen, dass die Wertschöpfung größerer Anlagen nur in geringem Umfang lokal gebunden werden kann. So fällt bspw. GK IV in Bezug auf die kommunal verbleibende Wertschöpfung hinter GK I zurück. Hintergrund dieses Befunds ist einerseits, dass neben der Ortansässigkeit der Anlagenbetreiber:innen auch die Vorleistungen nur zum Teil einen lokalen Bezug aufweisen. Andererseits erfordert der laufende Betrieb einer PV-Anlage keinen dauerhaften Personaleinsatz vor Ort. Zuletzt führt der Zuschnitt des föderalen Systems der Steuerzuordnung zu einem erheblichen Abfluss des durchaus vorhandenen steuerlichen Mehraufkommens.

Während der Betrieb einer PV-Anlage einzelwirtschaftlich für die Betreiber:innen höchst attraktiv ist, ist die wirtschaftliche und finanzielle Vorteilhaftigkeit für eine Kommune im Gesamtkontext nur bedingt gegeben. Immerhin ist es offenbar möglich, nachhaltig Wertschöpfung aus der Energieerzeugung in einen städtischen Kontext zu verlagern, was bei fossilen Energieträgern (insbesondere bei hohen Emissionen) nur bedingt möglich ist. Bei Kenntnis dieser Effekte dürfte dies Auswirkungen auf den Anreiz einer Kommune haben, sich in der Adoption von PV-Anlagen zu engagieren, um daraus wirtschaftliche und finanzielle Vorteile für die Standortgemeinde zu generieren.

Schlussbemerkung

Das Kapitel bietet einen Überblick über die Berechnung kommunaler Wertschöpfungseffekte aus dem PV-Betrieb in einem urbanen Kontext am Beispiel der Stadt Leipzig. Die verbesserte Datenlage und die Erweiterung der Methodik um den Eigenverbrauch, neuere EEG-Vergütungsmodelle sowie Änderungen in der Kostenstruktur ermöglichen eine detaillierte Berücksichtigung der aktuellen Entwicklungen. Es zeigt sich, dass sich der Betrieb von PV-Anlagen grundsätzlich nicht nur aus privatwirtschaftlicher Sicht, sondern auch aus kommunaler Perspektive lohnt. Durch die ausgeprägte Dynamik im PV-Bereich, die sich kostenseitig aus Lerneffekten und vergütungsseitig aus Veränderungen der Vermarktungsstruktur durch das EEG ergibt, ist die durchschnittliche kommunale Wertschöpfung im Jahr 2019 stark durch die Altersstruktur der Anlagen vor Ort geprägt. Aus kommunaler Sicht lassen sich aus den Ergebnissen geeignete Ansätze und Instrumente ableiten, welche auf eine Erhöhung der kommunalen Wertschöpfung abzielen. Mögliche Strategien bieten die Unterstützung des privaten PV-Ausbaus durch finanzielle Förderung und Beteiligung und somit die Skalierung, die Förderung eines kommunalen Clusters oder die wirtschaftliche Tätigkeit der Kommune selbst, ggf. über kommunale Eigenbetriebe oder durch die Nutzung kommunaler Flächen.

Danksagung

Dieser Beitrag wurde finanziert durch das Projekt „Smart Utilities and Sustainable Infrastructure Change“ (Antragsnummer 100378087 (SAB)).

Diese Maßnahme wird mitfinanziert durch Steuermittel auf der Grundlage des vom Sächsischen Landtag beschlossenen Haushaltes.



DOI: <https://doi.org/10.30819/5413.06>

Literatur

50Hertz Transmission GmbH, Hrsg. (2020a). *50Hertz Bewegungsdaten 2019*. URL: <https://www.netztransparenz.de/EEG/Jahresabrechnungen> (besucht am 02. 11. 2021).

- 50Hertz Transmission GmbH, Hrsg. (2020b). *EEG-Anlagenstammdaten 50Hertz Transmission GmbH zur Jahresabrechnung 2019*. URL: <https://www.netztransparenz.de/EEG/Anlagenstammdaten> (besucht am 02. 11. 2021).
- 50Hertz Transmission GmbH, Amprion GmbH, TenneT TSO GmbH und TransnetBW GmbH, Hrsg. (2021). *EEG-Vergütungskategorientabelle: Mit allen Kategorien bis Inbetriebnahmejahr 2021*. URL: <https://www.netztransparenz.de/EEG/Verguetungs-und-Umlagekategorien> (besucht am 02. 11. 2021).
- BMVBS (2013). *Regionalwirtschaftliche Effekte der erneuerbaren Energien II. Einfluss der Regionalplanung und Raumordnung auf regionale Wertschöpfung*. Hrsg. von Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung.
- Bundesnetzagentur, Hrsg. (o. J.). *Marktstammdatenregister*. https://www.bundesnetzagentur.de/DE/Sachgebiete/ElektrizitaetundGas/Unternehmen_Institutionen/DatenaustauschundMonitoring/Marktstammdatenregister/MaStR. (Besucht am 02. 11. 2021).
- Bundesnetzagentur und Bundeskartellamt, Hrsg. (2021). *Monitoringbericht 2020: Monitoringbericht gemäß § 63 Abs. 3 i. V. m. § 35 EnWG und § 48 Abs. 3 i. V. m. § 53 Abs. 3 GWB: Stand: 1 März 2021*. Bonn.
- Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme ISE und PSE Projects GmbH (2020). *Photovoltaics Report*. Freiburg.
- Gewerbesteuerergesetz in der Fassung der Bekanntmachung vom 15. Oktober 2002 (BGBl. I S. 4167), das zuletzt durch Artikel 9 des Gesetzes vom 21. Dezember 2020 (BGBl. I S. 3096) geändert worden ist: GewStG a.F. (o.D.)*.
- Grundgesetz für die Bundesrepublik Deutschland in der im Bundesgesetzblatt Teil III, Gliederungsnummer 100-1, veröffentlichten bereinigten Fassung, das zuletzt durch Artikel 1 u. 2 Satz 2 des Gesetzes vom 29. September 2020 (BGBl. I S. 2048) geändert worden ist (GG) (o.D.)*.
- Haller, A. (1997). *Wertschöpfungsrechnung: Ein Instrument zur Steigerung der Aussagefähigkeit von Unternehmensabschlüssen im internationalen Kontext*. Finanzwirtschaftliche Führung von Unternehmen. Stuttgart: Schäffer-Poeschel. ISBN: 9783791011509.
- Hirschl, B., A. Aretz, A. Prahl, T. Böther und K. Heinbach (2010). *Kommunale Wertschöpfung durch Erneuerbare Energien*. Bd. 196. Schriftenreihe des IÖW. Berlin: Institut für ökologische Wirtschaftsforschung.
- Jenniches, S. und J. Schneider (2017). *Potenziale und Chancen einer regionalen Wertschöpfung durch Erneuerbare Energien in der Städteregion Aachen*. o. O.
- Klobasa, M., B. Lux, B. Pfluger, M. von Bonin, N. Gerhardt, V. Lerm, D. Nill und S. Schäfer-Stradowsky (2018). *Monitoring der Direktvermarktung*. Hrsg. von Bundesministerium für Wirtschaft und Energie.
- Kolb, K., M. Springsklee und M. Hesse (2021). *Regionalwirtschaftliche Effekte aus dem Betrieb von Photovoltaikanlagen – Methodenpapier zur Wertschöpfungsanalyse*. Leipzig. doi: 10.36730/2021.3.af.wi.1.
- Kosfeld, R. und F. Gückelhorn (2012). »Ökonomische Effekte erneuerbarer Energien auf regionaler Ebene«. In: *Raumforschung und Raumordnung* 70.5, S. 437-449. doi: 10.1007/s13147-012-0167-x.
- Lenk, T. und P. Glinka (2017). »Die Länder in den finanziellen Ausgleichssystemen: Verteilung von Aufgaben, Ausgaben und Einnahmen sowie die finanzielle Entwicklung der Länder im Vergleich zu Bund und Kommunen«. In: *Haushalts-*

und Finanzwirtschaft der Länder in der Bundesrepublik Deutschland. Hrsg. von T. Schweisfurth und W. Voß. Schriften zur öffentlichen Verwaltung und öffentlichen Wirtschaft. Berlin: Berliner Wissenschaftsverlag, S. 79–116. ISBN: 978-3-8305-3731-1.

Teil III.

Softwaretechnische Umsetzung

Architektur und Umsetzung des Multi-Agenten-Modells zur Diffusion von Nachhaltigkeitsinnovationen

Daniel Abitz^{1,2}, Simon Johanning³

Highlights

- Für das Agentenmodell-Framework (IRPact) zur Simulation der Diffusion von Innovationen sollte eine leicht erweiterbare Implementierung erfolgen.
- Mittels eines modularen Design Patterns, welches die Austauschbarkeit von Komponenten ermöglicht, wurde diese Anforderung umgesetzt.
- Das Framework IRPact ermöglicht den Nutzenden über einen Baukasten an Komponenten und Funktionen (von der Parametrisierung der Agenten, über die Bereitstellung von Eingabedaten und deren Verarbeitung bis hin zur Ergebnisdarstellung) problemorientierte Szenarien zu erzeugen und zu simulieren.
- Existierende Szenarien lassen sich dank der starken Modularisierung leicht um neue Aspekte erweitern und parametrisieren.

Einführung

Zur Abbildung der im Projekt entwickelten fachlichen Modellierung im Rahmen eines agentenbasierten Modells zur Diffusion nachhaltiger Inno-

¹Institut für Informatik, Universität Leipzig

²Universitätsrechenzentrum, Universität Leipzig

³Institut für Infrastruktur und Ressourcenmanagement, Universität Leipzig

tionen wurde im Vorfeld des Projektes ein strukturell flexibles, modulares und erweiterbares Framework zur Beschreibung und Implementierung bestehender und zukünftiger Modelle entwickelt.⁴

Die softwaretechnische Umsetzung der einzelnen Modellkomponenten wurde in diesem Ansatz jedoch stark zusammenhängend entwickelt. Dies hatte den Nachteil, dass sich einzelne Komponenten teilweise nur umständlich um neue Funktionalitäten erweitern ließen. Aus diesem Grund wurde der Ansatz zum modularen Agentensimulations-Framework IRPact weiterentwickelt. Dabei sollen Benutzer:innen bei der Konfiguration ein maximaler Grad an Freiheit geboten und über ein Baukastenprinzip die Modifikation von Komponenten zu ermöglicht werden.

Ein weiteres Ziel bei der Neuimplementierung von IRPact war zudem die Überarbeitung des grundlegenden Prinzips der Verhaltenssteuerung der Agenten. Dieses bestimmt wie die Agenten innerhalb der Simulation untereinander und mit der Simulationsumgebung (unter anderem mit Produkten und Ereignissen) interagieren. Zu diesem Zweck wurde das belief-desire-intention (BDI) Modell⁵ als grundlegender Architekturansatz für die Agentensimulation gewählt und implementiert. In den folgenden beiden Abschnitten wird zu diesem Zweck auf das Modell selber und die grundlegende Architektur sowie deren Kopplung eingegangen. Am Beispiel des Aufdach-Photovoltaik-Diffusionsmodells PVact wird die Anwendung des Frameworks verdeutlicht.

Belief-desire-intention Modell

Menschliche Entscheidungen werden häufig auf Basis mangelnder Informationen getroffen (*bounded rationality*).⁶ Ein geeignetes Modell für die Abbildung menschlicher Eigenschaften in Simulationen stellt das belief-desire-intention (BDI) Modell dar, welches für die Abstraktion menschlicher Entscheidungsfindung geeignet ist.⁷ Daher wird dieser Ansatz oft bei sozialwissenschaftlichen Simulationen verwendet.⁸ Beispiele hierfür

⁴Vgl. Johanning u. a., 2020.

⁵Vgl. Bratman, 1987.

⁶Vgl. Simon, 1955.

⁷Vgl. Norling, 2004.

⁸Vgl. Adam und Gaudou, 2016.

sind Verhaltensanalysen von Menschenmengen in Gefahrensituationen⁹ oder bei Evakuierungen¹⁰. Aber auch in Bezug auf ökonomische Aspekte findet die BDI-Architektur Anwendung. So wird es für die Simulation des Kaufverhaltens von Konsumenten herangezogen.¹¹

Das belief-desire-intention Modell beschreibt die menschliche Entscheidungsfindung mittels der folgenden drei Komponenten:

- belief:** Das *Wissen* über die Welt und das System an sich.
- desire:** Die *Motivation* ein bestimmtes *Ziel* zu erreichen.
- intention:** Die *Absicht* das gesetzte Ziel mittels der Durchführung von *Plänen* zu erreichen.

Dieses Konzept wurde für die Entwicklung intelligenter Agenten adaptiert.¹² BDI-Agenten besitzen *Wissen* über die Welt, in der sie sich befinden (**belief**). Dieses Wissen lässt sich durch *Kommunikation* mit anderen Agenten oder durch Schlussfolgerungen erweitern. Mittels *Plänen* versuchen sie ihr aktuelles Ziel zu erreichen (**desire** und **intention**). Pläne stellen dabei *Handlungsanweisungen* dar, welche von den Agenten durchgeführt werden. Als Resultat kann das Ziel nun entweder erfolgreich abgeschlossen oder verworfen werden. Der Aspekt, dass ein Agent überhaupt erst dazu animiert wird, ein Ziel zu verfolgen, wird über Ereignisse gesteuert. Diese können zum einen extern sein, zum Beispiel durch das Einbringen neuer Informationen in das System, oder durch eine Änderung ihrer Wissensbasis. Solche internen Ereignisse können beispielsweise durch die Kommunikation mit anderen Agenten ausgelöst werden.

Ein wichtiger Aspekt bei der Entscheidung für das BDI-Modell im Rahmen von IRPact war, dass es sich aufgrund seiner alltagspsychologischen Basis sehr gut auf Entscheidungsfindungsprobleme anwenden lässt. Es ermöglicht das Einbeziehen von verschiedenen Einflüssen, Faktoren und Schlussfolgerungen bei der Wahl der zu treffenden Entscheidung. Somit verspricht das BDI-Modell einen hohen Grad an Realitätsnähe.

⁹Vgl. Shendarkar u. a., 2008.

¹⁰Vgl. Bulumulla u. a., 2018.

¹¹Vgl. Baptista, C. Martinho u. a., 2013; Baptista, C. R. Martinho u. a., 2014.

¹²Vgl. Rao, Georgeff u. a., 1995.

Umsetzung des BDI-Modells in IRPact

Für die Umsetzung des BDI-Modells wurden dessen Konzepte in den entsprechenden Komponenten der Simulation umgesetzt. Das Wissen (**belief**) der Agenten wurde dadurch realisiert, dass sie Informationen über sich selbst, andere Agenten als auch Produkte haben und diese durch Aktionen, wie Kommunikation (internes Ereignis), verändern und erweitern können. Die Motivation (**desire**) wurde durch den Wunsch nach Produktdoption operationalisiert. Der letzte Bestandteil, die auf Plänen basierende Zielrealisierung (**intention**), wurde durch das Prozessmodell umgesetzt.

Als eine Simulation für die Diffusion von Innovationstechnologien lässt sich das grundlegende Prinzip von IRPact somit folgendermaßen zusammenfassen:

Innerhalb einer simulierten Umgebung können Verbraucheragenten angebotene Produkte adoptieren. Mittels Kommunikation mit anderen Verbrauchern tauschen sie Wissen aus und wecken somit potentiell bei diesen Interesse für einen Erwerb. Über den Simulationszeitraum betrachtet lässt sich somit die Diffusion des Produktes innerhalb der Agentenpopulation analysieren.

Eine Übersicht über die Hauptkomponenten ist in der Abbildung 7.1 dargestellt. Die fundamentale Modellkomponente ist das zeitliche Modell, welches den chronologischen Verlauf der Simulation beschreibt. Verbraucher, welche intern durch das Konzept `ConsumerAgents` repräsentiert werden, gehören Gruppen an, mit denen sie grundlegende Eigenschaften teilen. So besitzen alle Mitglieder einer Gruppe dieselben Typen von Eigenschaften, wenn auch mit unterschiedlicher Ausprägung. Durch das räumliche Modell können sie zusätzlich um positionsbezogene Informationen angereichert werden. Die zu adoptierenden Produkte gehören ebenfalls Gruppen an, um unterschiedliche Konfigurationen realisieren zu können. Das Kommunikationsverhalten beschreibt, wie Agenten Informationen austauschen und somit Bewusstsein und Interesse für neue Produkte erzeugen können. Zusätzlich bietet IRPact noch weitere Agententypen wie den `CompanyAgent` oder `PointOfSaleAgent`, welche Produkte herstellen bzw. zum Verkauf anbieten können oder den `PolicyAgent`, der politische Institutionen repräsentiert und simulationsweiten Einfluss haben kann. Weiterhin existieren Konzepte, welche die Produktwahrnehmung der Verbraucher modifizieren

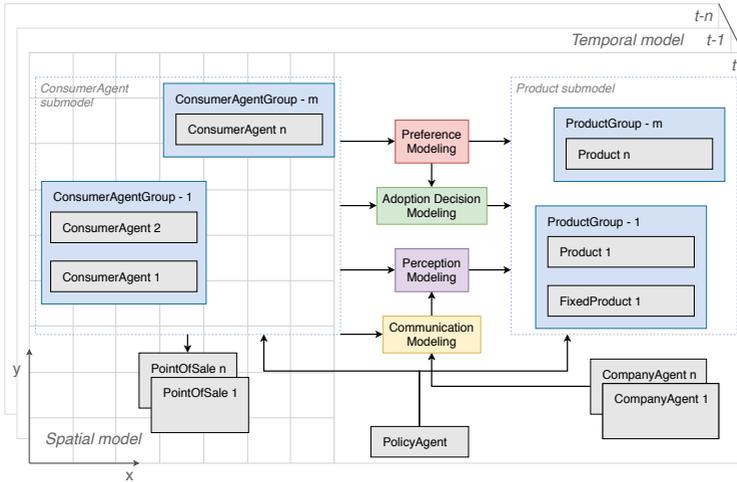


Abbildung 7.1.: Grundlegende Architektur von IRPact. Quelle: Johanning u. a., 2020.

können. In der Re-implementierung von IRPact wurde diese Möglichkeit der Wahrnehmung, sowie das Kommunikationsverhalten in einem Prozessmodell integriert und daraufhin modularisiert.

Design und Implementierung der Agenten

In Agentensimulationen gibt es eine Vielzahl verschiedener Agenten, welche sich in Bezug auf Eigenschaften, Fähigkeiten und Aufgaben unterscheiden. Technisch ist es häufig darüber hinaus nötig, sogenannte Systemagenten zu verwenden, die keine realen Akteure repräsentieren. Ihre Aufgaben beziehen sich auf die Steuerung und den korrekten Ablauf der Simulation bzw. das System.

Verbraucheragenten stellen die wichtigste Agentenkategorie innerhalb von IRPact dar. Analog zu realen Verbrauchern benötigen sie die Fähigkeit, Aktionen durchführen können, sowie sich mit anderen Agenten in Netz-

werken zu verknüpfen. Die wichtigste Aktion ist dabei die Kommunikation mit anderen Agenten.

Verbraucher als Agenten

Der Modellierungsansatz von IRPact folgt dem Paradigma der Objektorientierten Programmierung. Im Rahmen dessen wird den `ConsumerAgents` eine räumliche Verortung (Wohnsitz), sowie die Weitergabe von Informationen (Informationslegitimation) zugesprochen. In diesem Sinne gelten sie sowohl als `SpatialAgents`, als auch als `InformationAgent`. Dieser als Generalisierung bezeichnete Ansatz ist ein wichtiger Bestandteil der Objektorientierten Programmierung; er verleiht den `ConsumerAgent` beide Eigenschaften.

Soziale und lokale Netzwerke

Verbraucher sind in soziale Netzwerke eingebettet, welche auf Freundschaften, Familienzugehörigkeit, dem sozialen Milieu oder anderen Aspekten beruhen. Diese Netzwerke besitzen dabei einen großen Einfluss auf die Haltung der jeweiligen Individuen, weshalb sie in IRPact ebenfalls umgesetzt sind. Die Implementierung erfolgte über gerichtete Graphen, deren Verbindungen Kommunikationsmöglichkeiten repräsentieren. Kanten von Agent *A* nach Agent *B* werden so operationalisiert, dass *A* mit *B* eine Kommunikation initiieren kann. In Anbetracht dessen, dass der Graph gerichtet ist, kann jedoch *B* keine Kommunikation mit *A* starten, wenn nicht auch eine Kante von *B* nach *A* existiert. Das implementierte soziale Netzwerk ermöglicht somit Kommunikation zwischen Agenten.

Neben dem sozialen existiert auch ein räumlich-lokales Netzwerk. Die Idee basiert dabei auf der realen Sichtbarkeit der Agenten. Die durch `ConsumerAgents` repräsentierten Verbraucher besitzen über den oben genannten `SpatialAgent` eine räumliche Zuordnung. Durch das räumliche Modell können auf Basis dieser Informationen Entfernungen berechnet und eine Benutzer:innen-spezifische Sichtbarkeit definiert werden. Im Gegensatz zum sozialen Netzwerk ist das räumlich-lokale somit nicht explizit implementiert. Es entsteht implizit durch das räumliche Modell und die entsprechend zugeordneten Informationen der Agenten.

Kommunikation zwischen Agenten

Einer der wichtigsten Aspekte einer Agentensimulation ist die Fähigkeit der Kommunikation zwischen Agenten. Sie ermöglicht den direkten Wissens- und Informationsaustausch und bildet somit die Grundlage für die Verbreitung von Bewusstsein (über die Existenz betrachteter Produkte und deren Eigenschaften) und Interesse (an dem möglichen Erwerb eines Produktes) innerhalb der Simulation. In IRPact findet die Kommunikation dabei immer bilateral statt. Ein Agent kann zur selben Zeit immer nur mit exakt einem anderen Agenten kommunizieren. In diesem Zusammenhang erforderte der parallele Implementierungsansatz von IRPact und somit die potenziell parallele Ausführung von Kommunikationsereignissen besondere Achtsamkeit. Da ein Agent nur immer mit exakt einem anderen Agenten kommunizieren und nur eine begrenzte Anzahl an Aktionen ausführen kann, wurde der Ablauf der Kommunikation entsprechend koordiniert, da eine mangelhafte Implementierung bei parallelen Prozessen zu race conditions (deut. Wettlaufsituationen) führen kann, wodurch ein Agent mehr Aktionen durchführen könnte, als ihm zusteht. Um race conditions zu vermeiden, wurde ein synchronisierter Kommunikationsmechanismus implementiert. Dabei versetzt sich der Kommunikationsinitiator als erstes in den Kommunikationsmodus. Sollte der Initiator nun von einem anderen Agenten angesprochen werden, wird er das Gespräch ablehnen, da er sich bereits in einem befindet. Anschließend sucht er in seinem sozialen Umfeld zufällig nach einem potentiellen Kommunikationspartner. Sobald er diesen gefunden hat, wird eine Kommunikationsanfrage gesendet. Falls der Zielagent zu dem Zeitpunkt keine Aktion ausführt und noch freie Aktionen zur Verfügung hat, sendet dieser ein positives Feedback zurück und versetzt sich zudem selbst in den Kommunikationsmodus. Anschließend kann der Informationsaustausch durchgeführt werden. Zum Ende wird der Kommunikationsmodus beendet und die Agenten sind für weitere potentielle Aktionen verfügbar. Sollte der Initiator keinen validen Kommunikationspartner finden, gilt der Kommunikationsversuch als fehlgeschlagen und die Aktion wird erfolglos beendet.¹³

¹³Hierdurch tritt ein Verhalten äquivalent mit der Operation 'NOP' (keine Aktion) auf, da die Aktion hiermit aufgebraucht wird.

Prozessmodell

Das Prozessmodell in IRPact beschreibt die Ausgestaltung von Prozessen, insbesondere des Entscheidungsprozesses. Der Aufbau eines Prozessmodells kann komplex sein und aus mehreren Teilkomponenten bestehen. Ein solches kann integral (also das Modell als Ganzes beschreibend) oder modular aufgebaut sein (bei welchem Komponenten unabhängig voneinander nutzbar und miteinander verbunden sind). Ein integraler Ansatz hat dabei den Nachteil, dass Benutzer:innen das Prozessmodell nur als Einheit nutzen können. Optionen zur Aktivierung oder Deaktivierung von Funktionalitäten müssen individuell implementiert sein und können durch Benutzer:innen nicht nachträglich hinzugefügt werden. Um Flexibilität in der Gestaltung verschiedener Prozesse zu ermöglichen und Benutzer:innen zu ermächtigen, verschiedene Prozesse auch entwicklerunabhängig umzusetzen, wurde das ursprünglich integrale Prozessmodell zu einem modularen Prozessmodell weiterentwickelt. Den Benutzer:innen steht nun eine Vielzahl verschiedener Module zur Verfügung, welche zu komplexen Strukturen kombiniert werden können. Module unterscheiden sich dabei bezüglich ihres Ausgabetypes und lassen sich diesbezüglich gruppieren. Die folgende Tabelle legt die unterstützten Arten mit der jeweiligen Ausgabe dar.

Tabelle 7.1.: Darstellung der Modul- und Ausgabetypes in IRPact.

Modultyp	Ausgabetyt
Aktion	-
Berechnung	Zahlwert
Entscheidung	ja/nein
PVact	Phase

Aktionsmodule haben keine definierte Ausgabe und können als *finale* Handlung interpretiert werden. Die folgende Tabelle stellt für jeden Typ beispielhaft einen entsprechenden Kandidaten und seine Funktion vor.

Neben einer Ausgabe können Module auch Eingaben besitzen. Diese sind für jedes Module individuell definiert. So besitzt der *Addierer* eine Liste von Berechnungsmodulen als Eingabe, deren Werte er addiert und die

Tabelle 7.2.: Übersicht über die Modultypen in IRPact.

Modultyp	Beispiel	Funktion
Aktion	Kommunikator	Startet Kommunikation mit anderen Agenten
Berechnung	Addierer	Berechnung der Summe
Entscheidung	Grenzwertest	Bestimmt, ob der Eingabewert über einem Grenzwert liegt
PVact	Adoptionsentscheider	Bestimmt Adoptionsstatus basierend auf dem Eingabewert

Summe als Ergebnis weitergibt. Die Verknüpfung von Modulen ist dabei immer unidirektional, wodurch die Modulstruktur als gerichteter Graph interpretiert werden kann.

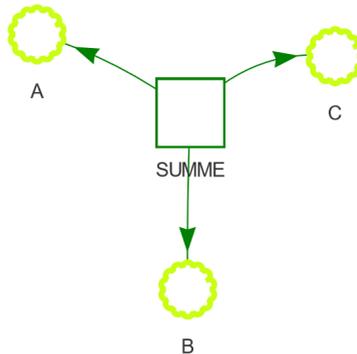


Abbildung 7.2.: Modulgraph für die Addition von drei Werten A , B und C . Eigene Darstellung.

Mit dieser Modularisierung können Benutzer:innen nun ein Prozessmodell erstellen und modulweise definieren, wo Daten herkommen, wie sie verarbeitet und anschließend final ausgewertet werden sollen. Äquivalent zum komponentenbasierten Ansatz von IRPact wurde das modulare

Prozessmodell so konzipiert, dass es leicht durch neue Module erweitert werden kann. Die Weboberfläche (vgl. dazu das Kapitel über die Benutzeroberfläche in diesem Band) ermöglicht eine Visualisierung konstruierter Prozessmodelle, um die Gesamtübersicht zu vereinfachen. Ein Beispiel dafür ist in Abbildung 7.2 mittels der Addition von drei Wert gegeben. Die Pfeilrichtung der Kanten vom Addierer **SUMME** zu den Modulen **A**, **B** und **C** zeigt die Richtung der Befehlsaufrufe. Der Informationsfluss findet entgegen der Pfeilrichtung statt. Der Addierer *fragt* bei den drei Modulen an und *erhält* die zu addierenden Werte. Die berechnete Summe kann nun an andere gekoppelte Module für weitere Analysen übermittelt werden.

Umsetzung und Instanziierung am Beispiel von PVact

Für die Verwendung von IRPact müssen Benutzer:innen eine parametrisierte Konfiguration aus den zur Verfügung stehenden Agententypen und Komponenten erstellen. Eine solche Konfiguration wird im Kontext von IRPact als Szenario bezeichnet. Im Rahmen des Projektes ist auf Basis der Fallstudien (Kapitel Fallstudien), dem Entscheidungsverhalten (Kapitel Entscheidungsverhalten Energieakteure) sowie der empirisch basierten Haushaltsagenten (Kapitel Empirische Verankerung) das PVact Szenario konfiguriert und parametrisiert worden.

Konfiguration und Parametrisierung

Die Agentengruppen im PVact Szenario wurden entsprechend den Sinus-Milieus erstellt und parametrisiert (Vergleich Kapitel Empirische Verankerung). Es existiert nur ein PV Produkt, dessen Wahrnehmung trivial ist.¹⁴ Die Adoption erfolgt direkt, wodurch Hersteller und Verkäufer wegfallen. Das zeitliche Modell basiert auf wöchentlichen diskreten Zeitschritten. Somit besteht ein Simulationsjahr, welches am 01.01. beginnt, aus 52 Schritten.

¹⁴Dieses bedeutet, dass Produktattribute direkt beobachtet werden können (also die Wahrnehmung dieser den tatsächlichen Produkteigenschaften entspricht). Weiterhin sind sich alle *ConsumerAgents* der Eigenschaften des Produktes bewusst.

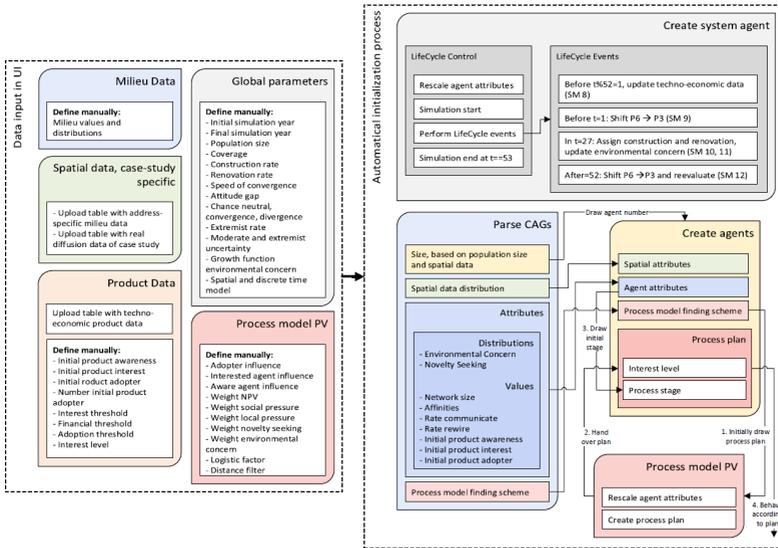


Abbildung 7.3.: Instanzierungsprozess von IRPact am Beispiel von PVact. Eigene Darstellung.

Eine Gesamtübersicht über alle Eingaben ist auf der linken Seite von Abbildung 7.3 dargestellt. Für die Umsetzung des Prozessmodells aus dem Kapitel über das Entscheidungsverhalten von Energieakteuren wurden die einzelnen Phasen (Vergleich Abbildung 3.1) als Module gekapselt und implementiert. Dabei lag das Hauptaugenmerk auf einer möglichst feingranularen Umsetzung. Bei der Modularisierung hat sich gezeigt, dass die Bewusstseins- und Machbarkeitsphase in ihrer Funktionalität kompakt sind und als eigenständige Module implementiert werden können. Im Gegensatz dazu wurde die Evaluierungsphase sehr stark modularisiert. Dies hatte zum Ziel, die zugrunde liegenden mathematischen Beschreibungen komplett über Module zu realisieren. Für die grundlegende Phasensteuerung wurde ein spezielles Verwaltungsmodul implementiert. Insgesamt besteht der resultierende Modulgraph aus über 30 Modulen, wobei ein Großteil auf die Evaluierungsphase entfallen.

Initialisierungsprozess

Mit dem Start und der Szenarioübergabe an IRPact wird ein komplexer Initialisierungsprozess gestartet, welcher am Beispiel von PVact in der rechten Hälfte von Abbildung 7.3 dargestellt ist. Im ersten Schritt wird das übergebende Szenario eingelesen und validiert, um fehlerhafte Konfigurationen vor dem eigentlichen Simulationsstart erkennen zu können. Im Anschluss an die erfolgreiche Validierung werden alle benötigten Agenten und Komponenten auf Basis der übergebenden Parametrisierung instanziiert. Während dieses Prozesses können die einzelnen Instanzen auf Basis verschiedener Eingabedaten konfiguriert werden. Die Konsumentengruppen werden über die im Szenario direkt definierten Milieudaten erstellt. Mittels der tabellarisch definierten Adressinformationen erhalten die Verbraucher ihre räumlichen Koordinaten sowie Informationen zu Dachausrichtung und -neigung. Äquivalent erfolgt die Instanzierung des PV Produktes, des Prozessmodells sowie weiterer Teilmodelle. Im Zusammenhang mit dem Prozessmodell wird für jeden Agenten ein sogenannter Prozessplan erstellt. Bei diesem handelt es sich um die Umsetzung des *Planes* aus dem BDI-Modell. Der Prozessplan beschreibt für jeden Agenten, welches Prozessmodell für die Zielerfüllung (= Produktadoption) verwendet werden soll. Neben den durch Benutzer:innen im Szenario definierten Agenten instanziiert IRPact auch noch einen speziellen Systemagenten. Dieser überwacht und kontrolliert den Verlauf, indem er für den Start und die Beendigung der Simulation sowie den chronologisch korrekten Ablauf von zeitlichen Ereignissen verantwortlich ist.

Mit Beendigung des Initialisierungsprozesses erhält der Systemagent das Signal zum Starten der Simulation und es beginnt der diskrete Ablauf. In jedem Zeitschritt durchlaufen die Verbraucher ihren Prozessplan und führen, basierend auf dem Entscheidungsverhalten (Vergleich Abbildung 3.1), entsprechende Aktionen durch. Nach Beendigung des letzten validen Zeitschritts beendet der Systemagent die Simulation und die Phase der Auswertung und Nachbearbeitung beginnt. Im Zuge dieser Nachanalyse werden verschiedene Statistiken über das Adoptionsverhalten sowie die Verläufe des Produktinteresses und der Attribute der Agenten erstellt. Diese werden für die Agentenpopulation als Ganzes oder aufgeschlüsselt nach Milieus bzw. Quantilen visualisiert. Auf Basis der Ergebnisse werden abschließend die konfigurierten Abbildungen erzeugt.

Danksagung

Dieser Beitrag wurde finanziert durch das Projekt „Smart Utilities and Sustainable Infrastructure Change“ (Antragsnummer 100378087 (SAB)).

Diese Maßnahme wird mitfinanziert durch Steuermittel auf der Grundlage des vom Sächsischen Landtag beschlossenen Haushaltes.



DOI: <https://doi.org/10.30819/5413.07>

Literatur

- Adam, C. und B. Gaudou (2016). »BDI agents in social simulations: a survey«. In: *The Knowledge Engineering Review* 31.3, S. 207–238.
- Baptista, M. L., C. Martinho, F. Lima, P. A. Santos und H. Prendinger (2013). »A Business Simulation with an Agent-Based Deliberative Model of Consumer Behaviour«. In: *International Conference on Games and Learning Alliance*. Springer, S. 215–223.
- Baptista, M. L., C. R. Martinho, F. Lima, P. A. Santos und H. Prendinger (2014). »An agent-based model of consumer behavior based on the BDI architecture and neoclassical theory«. In: *Developments in Business Simulation and Experiential Learning: Proceedings of the Annual ABSEL conference*. Bd. 41.
- Bratman, M. (1987). *Intention, plans, and practical reason*. Bd. 10. Harvard University Press Cambridge, MA.
- Bulumulla, C., J. Chan und L. Padgham (2018). »Enhancing diffusion models by embedding cognitive reasoning«. In: *2018 IEEE/ACM International Conference on Advances in Social Networks Analysis and Mining (ASONAM)*. IEEE, S. 744–749.
- Johanning, S., F. Scheller, D. Abitz, C. Wehner und T. Bruckner (2020). »A modular multi-agent framework for innovation diffusion in changing business environments: conceptualization, formalization and implementation«. In: *Complex Adaptive Systems Modeling* 8.1. doi: 10.1186/s40294-020-00074-6.
- Norling, E. (2004). »Folk psychology for human modelling: Extending the BDI paradigm«. In: *Proceedings of the Third International Joint Conference on Autonomous Agents and Multiagent Systems-Volume 1*. IEEE Computer Society, S. 202–209.
- Rao, A. S., M. P. Georgeff u. a. (1995). »BDI agents: from theory to practice.« In: *ICMAS*. Bd. 95, S. 312–319.
- Shendarkar, A., K. Vasudevan, S. Lee und Y.-J. Son (2008). »Crowd simulation for emergency response using BDI agents based on immersive virtual reality«. In: *Simulation Modelling Practice and Theory* 16.9, S. 1415–1429.
- Simon, H. A. (1955). »A behavioral model of rational choice«. In: *The quarterly journal of economics* 69.1, S. 99–118.

IRPsim – Eine webbasierte Ausführungsinfrastruktur für Energiesystemmodelle

Stefan Kühne^{1,2}, David Georg Reichelt^{1,2}, Andreas Kluge^{1,2}, Moritz Engelmann^{1,2}

Highlights

- Zur nutzerfreundlichen Anwendung von Energiesystemmodellen wie IRPopt und IRPact, wurde die webbasierte Simulationsinfrastruktur IRPsim entwickelt.
- IRPsim verbirgt die Komplexität des zugrundeliegenden Formalismus durch nutzerfreundliche Ein- und Ausgabeelemente.
- IRPsim reduziert den notwendigen Konfigurationsaufwand durch Mechanismen zur Wiederverwendung von Konfigurationswissen.
- IRPsim ermöglicht über einen modellgetriebenen Softwareentwicklungsprozess die effiziente Umsetzung von Modellanpassungen und -erweiterungen.

Einleitung

Energiesystemmodelle wie deeco,³ DER-CAM,⁴ IRPopt⁵ oder IRPact⁶ charakterisieren Energiesysteme aus verschiedenen Modellierungsperspek-

¹Universitätsrechenzentrum Leipzig, Universität Leipzig

²Institut für Angewandte Informatik e. V.

³Vgl. Bruckner, 1997.

⁴Vgl. Stadler u. a., 2014.

⁵Vgl. Scheller, Burgenmeister u. a., 2018.

⁶Vgl. Johannig u. a., 2020.

tiven. Aspekte dieser Perspektiven sind:

- Marktteilnehmer, von denen in unterschiedlichen Rollen verschiedene Dienstleistungen entlang der Wertschöpfungskette abgeleitet werden (kommerzielle Akteure),
- technische Komponenten, aus denen relevante energietechnische Prozesse abgeleitet werden (Engineering-Komponenten),
- Energieflüsse und andere Komponentenbeziehungen innerhalb der Energiesystemkonfiguration (Komponentenbeziehungen),
- vertragliche Beziehungen zwischen Akteuren, die die jeweilige Leistungserbringung umfassen (operative Koordinationen),
- regulatorische sowie produktbezogene Anforderungen des Geschäftsumfelds (Marktprinzipien) und
- kontextabhängige Vorgaben räumlicher, ökologischer und zeitlicher Gegebenheiten (kommunale Kontexte).

Die Verwendung derartiger Energiesystemmodelle erfordert umfangreiche Eingabedaten und Konfigurationsinformationen über Akteure, Komponenten, Komponentenbeziehungen und Restriktionen des untersuchten Energiesystems. Darüber hinaus sind Annahmen und Prognosen über die zukünftige Entwicklung der Energiesysteme erforderlich, z. B. bezüglich der Entwicklung von Preisen, Steuern, regulatorischen Rahmenbedingungen und Märkten. Dies ist unter anderem bei Analysen zu innovativen Geschäftsmodellen wie Nachbarschaftsspeicher, Lastverschiebung, Eigenverbrauch, Direktnutzung und Direktvermarktung ersichtlich.⁷ Der praktische Einsatz in kommunalen und industriellen Nutzungsszenarien bringt zudem Herausforderungen im Datenmanagement mit sich, darunter das Management von Stammdaten, die Organisation von Datenworkflows, die Integration von Daten aus unterschiedlichen Quellen und der Umgang mit der Datenqualität. Diese Aspekte stellen herausfordernde Aufgaben dar und müssen durch eine leistungsfähige Software-Infrastruktur unterstützt werden.

In diesem Beitrag stellen wir den generischen IRPsim-Ansatz zur Unterstützung der Ausführung von Energiesystemmodellen am Beispiel der Modelle IRPopt und IRPact vor. Zunächst konzentrieren wir uns auf Anforderungen des zugrundeliegenden Softwareentwicklungsprozesses

⁷Vgl. Scheller, Burkhardt u. a., 2020; Scheller, Krone u. a., 2018; Scheller, Reichelt u. a., 2017.

zur Abbildung der oben genannten Aspekte des Lebenszyklus. Anschließend beschreiben wir die entwickelten Konzepte zur Unterstützung der Anforderungen an Benutzerfreundlichkeit und Flexibilität.

Nicht-funktionale Anforderungen an eine webbasierte Simulationsinfrastruktur

Wesentliche nicht-funktionale Anforderungen an eine webbasierte Simulationsinfrastruktur sind Benutzerfreundlichkeit und Flexibilität. Die bereitgestellten Benutzeroberflächen sollen sicherstellen, dass alle notwendigen Konfigurations- und Parametrierungsaufgaben mit möglichst geringem manuellem Aufwand durchgeführt werden können. Hierzu gehören Automatismen und intelligente Methoden zur Modellparametrisierung, domänenspezifische Abstraktionen für Modellparameter und die Validierung domänen-spezifischer Randbedingungen.

Gleichzeitig darf die Agilität der Analyseprozesse nicht eingeschränkt werden. Die Analyseaufgaben und -fragen für verschiedene Stakeholder entwickeln sich im Laufe der Zeit ständig weiter. Dies erfordert Änderungen an Eingabeschnittstellen, Modellparametern, Visualisierungen und sogar Änderungen an der Laufzeitumgebung, die durch Speicher- und Rechenressourcen gekennzeichnet ist. Die bereitgestellte Software-Infrastruktur muss daher die Flexibilität und Skalierbarkeit bieten, um solche Änderungsanforderungen abzubilden.

Das einer Simulationsinfrastruktur zugrunde liegende Energiesystemmodell bestimmt mit seinen Vorgaben hinsichtlich Ein- und Ausgangsparametern und Laufzeitumgebung (z. B. Solver) maßgeblich den Aufbau und das Design der Softwarekomponenten für den Umgang mit Ein- und Ausgabedaten, die Datenspeicherung, Visualisierung und Darstellung von Ergebnissen. Die Abhängigkeit der Softwareumgebung vom Energiesystemmodell impliziert, dass Änderungen am Modell direkte Auswirkungen auf eine oder mehrere Softwarekomponenten haben können. Beispielsweise erfordert das Hinzufügen eines Modelleingabeparameters neue Eingabefelder, ggf. neue Visualisierungsarten, Änderungen an Strukturübersichten und Aktualisierungen von Abhängigkeiten zu anderen Parametern. Tech-

nisch kann das Hinzufügen eines Eingabeparameters Änderungen an der Speicherinfrastruktur und den Kommunikationsschnittstellen erfordern.

Nach unseren Erfahrungen unterliegt ein Energiesystemmodell zudem kontinuierlichen Veränderungen in der praktischen Anwendung. Aus technischer Sicht impliziert dies die Notwendigkeit eines Life-Cycle-Managements der Software-Code-Infrastruktur, welche das Modell und die abhängigen Softwarekomponenten interoperabel und synchron hält.

Um dieses Problem anzugehen, folgen wir einem modellgetriebenen Softwareentwicklungsprozess.⁸ Innerhalb dieses Ansatzes werden wesentliche Teile der zu entwickelnden Softwareinfrastruktur automatisch aus einer zugrunde liegenden domänenspezifischen Spezifikation generiert. Dies entspricht der sogenannten generativen Architektur, die das Konzept einer Abbildung zwischen einem Problemraum und einem Lösungsraum beschreibt. Der Problemraum stellt eine Reihe von domänenspezifischen Abstraktionen und Konzepten dar, mit denen Fachexperten ihr technisches Problem ausdrücken können. Der Lösungsraum hingegen besteht aus implementierungsorientierten Abstraktionen, die für eine bestimmte Laufzeitumgebung instanziiert werden können (z. B. basierend auf Datenbankkomponenten, Middleware-Infrastruktur, Frontend-Technologien). Abhängig von der konkreten Spezifikation des Problemraums wird über ein Mapping automatisch eine passende Lösung generiert. Das Mapping generiert schematische Codefragmente, die in eine generische Infrastruktur eingebettet sind und mit individuellem, handgeschriebenem Softwarecode ergänzt werden können.⁹

Szenario-basierte Konfiguration

Mit Hunderten von Eingangsparametern – Skalare, Arrays, Sets, Zeitreihen – erfordert die Anwendung eines Energiesystemmodells in der Praxis einen erheblichen Konfigurationsaufwand, um reale Geschäftsszenarien zu bewerten. Ein wichtiger Aspekt bei der Reduzierung des Konfigurationsaufwands ist die Wiederverwendung von Konfigurationswissen. Um diese

⁸Vgl. Czarnecki, 2004.

⁹Vgl. Kühne u. a., 2019.

Anforderung hinsichtlich Nutzerfreundlichkeit zu erfüllen, verwenden wir den Ansatz der szenariobasierten Konfiguration.

Die Idee dahinter ist, dass die zahlreichen Parameter eines Modells nicht unabhängig voneinander in eine Spezifikation einer Simulation einfließen. Vielmehr bestimmen grundsätzliche Annahmen über zukünftige Entwicklungen – z. B. Annahmen über die Entwicklung von Preisen, Technologien oder Märkten – die konkrete Zuordnung von Parametern. Typische Annahmen eines Geschäftsszenarios können zusammengefasst und beispielsweise als „business as usual“, „collaborative economy“ oder „consumer efficiency“ deklariert werden. Für jedes Geschäftsszenario können vordefinierte Datenwerte (Skalare, Zeitreihen) mit Eingabeparametern eines Modellparametersatzes für bestimmte Prognosehorizonte verknüpft werden. Die Anwendung eines Geschäftsszenarios in der Parametrisierungsphase des Modells führt zu einer Zuordnung der vordefinierten Werte, die dann vom Benutzer verfeinert und angepasst werden können.

Da die Datenwerte dynamisch aus einer Datenbank geladen werden, nennen wir dieses Verhalten „Pull-Funktionalität“. Die Herausforderung dieses Ansatzes liegt im Datenmanagement, insbesondere im Stammdatenmanagement, das die konsistente und vollständige Zuordnung der Werte gewährleisten muss und das wir im Folgenden beschreiben.

Datenmanagement

Die Grundlagen unseres Datenmanagementansatzes sind in folgendem Klassendiagramm (Abbildung 8.1) dargestellt. Das Kernkonzept ist Stammdaten (MasterData). Stammdateneinträge stellen Datenquellen dar, die Modelleingabeparametern zugeordnet werden können. Sie werden durch den Tupelnamen, den Typ (ein Verweis auf den Parameternamen des Modells) und das Referenzjahr (Verweis auf das Jahr, auf das sich die Prognose bezieht) eindeutig identifiziert. Für jede Stammdatenerfassung kann ein Datenmanager den Prognosezeitraum definieren, d. h. für wie viele Folgejahre Datensätze definiert werden können, und das Zeitintervall, in dem die Daten gespeichert werden. Optional können für Stammdateneinträge Set-Abhängigkeiten definiert werden. Diese Abhängigkeiten legen fest, für welche Menge und für welche Elemente der Menge die jeweilige Stammdateneingabe gelten soll. Diese Informationen werden in der

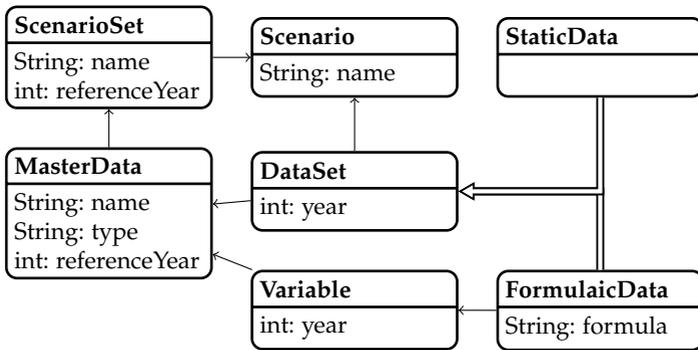


Abbildung 8.1.: Grundkonzepte des Datenmanagements in IRPsim. Eigene Darstellung.

IRPsim-Simulationsinfrastruktur zur Vorfilterung von Datensätzen und zur automatisierten Zuordnung innerhalb der Pull-Funktionalität verwendet.

Stammdateneinträge werden hierarchisch über die Relation „verfeinert“ organisiert. Die resultierende Hierarchie wird als Vererbungshierarchie interpretiert und sowohl auf Daten als auch auf Metadaten von Stammdateneinträgen angewendet. Beispielsweise werden Metadaten, die in einer bestimmten Stammdatenerfassung fehlen, aus der allgemeineren Stammdatenerfassung entnommen. Gleiches gilt für zugeordnete Daten. Für spezifischere Stammdateneinträge steht ein für eine allgemeine Stammdatenerfassung hinterlegter Datensatz zur Verfügung und kann dort verfeinert werden.

Das Konzept **DataSet** stellt Datenwerte (Skalare oder Zeitreihen) dar, die Modelleingabeparametern in Abhängigkeit vom referenzierten Szenario, den festgelegten Abhängigkeiten und dem Zeitraum zugewiesen werden. Datensätze können auf zwei verschiedene Arten ausgedrückt werden. **StaticData**-Definitionen stellen numerische Datenwerte dar, die statisch in eine Datenbank importiert werden. Eine **FormulaicData**-Definition ermöglicht einen algebraischen Ausdruck von Datenwerten. Dazu können vorhandene **DataSets** oder vordefinierte Konstanten, z. B. ein Zeitvektor, der einen Zwölf-Stunden-Zyklus darstellt, verwendet werden.

Mit Hilfe der algebraischen Darstellung können Abhängigkeiten zwischen

verschiedenen Skalaren oder Zeitreihen leicht erklärt und Datenwerte als Funktion einer beabsichtigten zeitlichen Entwicklung propagiert werden. Des Weiteren werden Datenbankredundanzen deutlich reduziert und die Flexibilität für den Anwender, bestehende Datendefinitionen zu manipulieren, erhöht. Die Auswertung der algebraischen Darstellungen erfolgt bei der Parameterübergabe an den Solver.

Abbildung 8.2 zeigt die Verwaltungsschnittstelle für Stammdateneinträge. Sie bietet Übersichten über definierte Metadateneinträge und gespeicherte Daten. In dieser Schnittstelle können FormulaicData-Einträge mithilfe eines Formeleditors ausgedrückt werden. Statische Datenelemente können über Excel-Tabellen importiert und exportiert werden. Für jede Metadateneingabe werden qualitätsrelevante Eigenschaften, z. B. Vollständigkeit, abgeleitet und eine zuständige Geschäftseinheit und Ansprechpartner zugeordnet. So können verschiedene Geschäftseinheiten an der Problemlösung teilnehmen, indem sie relevante Daten bereitstellen, um die Datenerfassung, -organisation und -weitergabe zu erleichtern.

Name	Parametertyp	Bezugsjah...	Prognoseh...	Auflösung	Vollständigke...	Szenarien	Set 1	Abstrak...
	par_SOC_DES_I X							
✓ Tesla Powerwall	par_SOC_DES_ES...	2015	0	Jahr	66.67%	Business as Usual, Collabo...	set_tech_DES...	false
✓ Tesla Powerwall	par_SOC_DES_ES...	2015	0	Jahr	66.67%	Business as Usual, Collabo...	set_tech_DES...	false
✓ Tesla Powerwall	par_SOC_DES_ES...	2015	0	Jahr	66.67%	Business as Usual, Collabo...	set_tech_DES...	false
✓ Quartierspeicher (I)	par_SOC_DES_ES...	2015	0	Jahr	33.33%	Business as Usual, Collabo...	set_tech_DES...	false
✓ Quartierspeicher (I)	par_SOC_DES_ES...	2015	0	Jahr	33.33%	Business as Usual, Collabo...	set_tech_DES...	false
✓ Quartierspeicher (I)	par_SOC_DES_ES...	2015	0	Jahr	33.33%	Business as Usual, Collabo...	set_tech_DES...	false

Abbildung 8.2.: Verwaltungsschnittstelle für Stammdateneinträge. Eigene Darstellung.

Graphische Repräsentation von Ein- und Ausgabedaten

Die graphische Repräsentation wird durch drei Werkzeuge unterstützt: Die Visualisierung des IRPopt-Systemmodells, die Visualisierung des IRPact-Agentengraphen und die Datenreihenvisualisierung.

IRPopt-Systemmodell Der sogenannte Energiesystemmodellgraph bietet eine intuitive Möglichkeit, gewünschte Systemkonfigurationen zu überprüfen und überlappende Beziehungen von Parametereinstellungen zu validieren (Beispiel siehe Abbildung 8.3). Um das Energiesystemmodell zu definie-

ren, muss für jedes Energiesystemelement, z. B. Umwandlungstechnologien oder Bedarfslasten, definiert werden, ob es existiert und wie es mit anderen Elementen verbunden ist. Die allgemeine Verwendung eines Energiesystemelements wird durch den Parameter *par_X_pss_model* definiert und die Verknüpfungen werden durch eine Reihe von Parametern definiert, die mit *par_X_* beginnen, z. B. definiert *par_X_E_DES_fromES_NS_toEGrid_energyLink*, ob eine Energieverbindung vom Energiespeicher (ES) zu einem Prosumstorer (NS) besteht. Beide werden durch boolesche Elemente definiert, die durch 0 oder 1 dargestellt werden. Da die Einstellung aller Parameter zeitaufwändig und fehleranfällig ist, unterstützt der Energiesystemmodellgraph das Auffinden von Problemen durch Visualisierung des konfigurierten Energiesystemmodells. Um das Verständnis des Energiesystems zu erleichtern, enthält die Grafik folgende Erweiterungen:

- **Energieflüsse:** Energieflüsse werden als Kanten des Graphen visualisiert. Die Farbe definiert die Art des Energieflusses, z. B. können graue Kanten Stromflüsse und blaue Ränder Wärmeströme darstellen.
- **Komponententyp:** Der Komponententyp wird durch die Form der Knoten visualisiert, z. B. kann eine dreieckige Pyramide ein Nettoelement darstellen und ein Kreis mit Brüchen kann Marktelemente darstellen.
- **Akteurssouveränität:** Die Akteurssouveränität wird durch die Farbe eines Knotens dargestellt, z. B. kann Blau die Vertriebs- und Marktseite darstellen und grün die Kundengruppe p1.
- **Technologien:** Die Technologien werden zusätzlich als Icons dargestellt, die z. B. Energienetz, Energiemarkt oder Wärmemarkt darstellen.

Insgesamt können Anwender mit Hilfe des Energiesystemmodellgraphen die Energie- und Finanzflüsse zwischen Marktsegmenten, Technologiekomponenten und Kundengruppen einer bestimmten Parameterkonfiguration visualisieren und auf Vollständigkeit überprüfen.

IRPact-Agentenetzwerkgraph Äquivalent zum Energiesystemmodellgraph in IRPopt ist es für den Nutzer von IRPact hilfreich, das Agentennetzwerk als Graph zu betrachten. Im Vergleich zum Systemmodell kann das Agentennetzwerk bedeutend größer werden, weshalb eine alternative

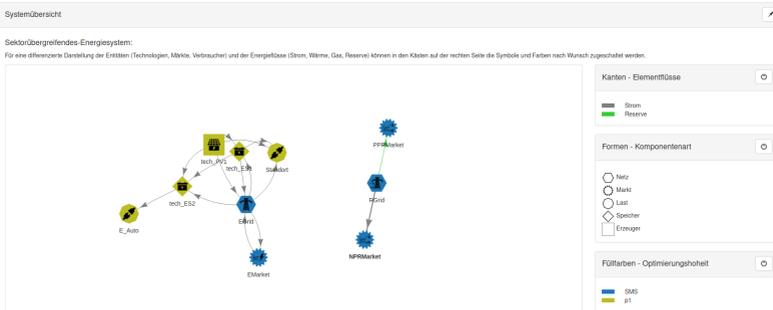


Abbildung 8.3.: Exemplarischer Energiesystemmodellgraph. Eigene Darstellung.

Möglichkeit der Darstellung benötigt wurde. Dafür wurde im Frontend die Möglichkeit geschaffen, ein durch das Backend generiertes Bild des Graphen anzuzeigen. Der Agentengraph wird dabei von IRPact selbst generiert und ist damit generisch; ein anderes Modell könnte folglich einen anderen Graphen generieren. Die Ansicht im Frontend verfügt über eine Zoom-Funktion, mit der die Größe des Graphenbilds geändert werden kann. Ebenfalls ist es möglich, das Bild lokal zu speichern. Die Abbildung 8.4 zeigt ein Beispiel für einen von IRPact visualisierten Graph, welcher das soziale Netzwerk der Agenten repräsentiert. Die Milieus sind dabei farblich kodiert und Kanten beschreiben potentielle Kommunikationspartner.

Datenreihenvisualisierung Zum Verständnis von Eingabe- und Ausgabedaten können Zeitreihen in einer zoombaren 2D-Visualisierung mit Aggregationsfunktionen wie Summe, Durchschnitt und Perzentilen oder in einer interaktiven 3D-Darstellung dargestellt werden. Die 3D-Anzeige ermöglicht die Visualisierung von Werten (auf z-Achse), die für spezielle Zeitintervalle aggregiert sind, z. B. um das Wochenintervall auf der y-Achse und die Stunde in der Woche auf der x-Achse zu visualisieren. Dies erleichtert die visuelle Identifizierung von Mustern, z. B. hoher Energieverbrauch zu Beginn jeder Woche oder jeden Tages. (siehe Abbildung 8.5).

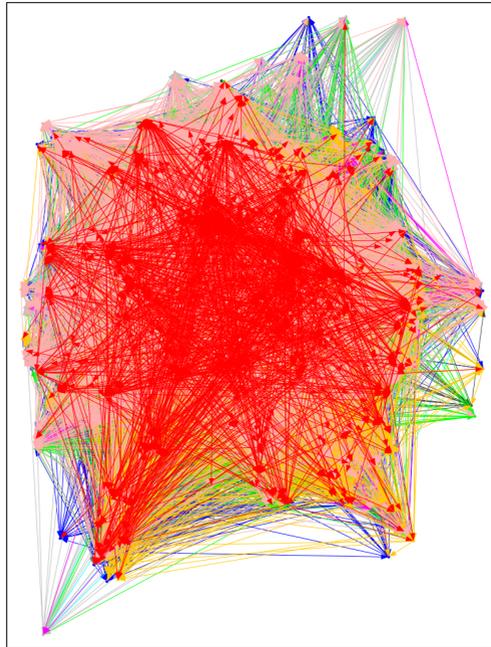


Abbildung 8.4.: Beispiel-IRPact-Agentennetzwerkgraph. Eigene Darstellung.

Skalierbare Ausführungsumgebung

Skalierbarkeitsanforderungen für die IRPsim-Softwareumgebung sind (1) horizontale Skalierbarkeit (Hinzufügen weiterer Rechenknoten) entsprechend der Modellgröße und Anzahl der Jobs und (2) vertikale Skalierbarkeit (Skalierung durch Hinzufügen von mehr Leistung in Bezug auf CPU & RAM zu bestehenden Rechenknoten), z. B. zum Starten verschiedener Instanzen des IRPopt-Systems für unterschiedliche organisatorische Anforderungen. Die IRPsim-Softwarekomponenten wurden als Micro-Service-Architektur mit Docker und Docker Compose¹⁰ implementiert. Die resultierende Software besteht aus drei zentralen Diensten: (1) dem UI-Service,

¹⁰Siehe <https://www.docker.com/>.

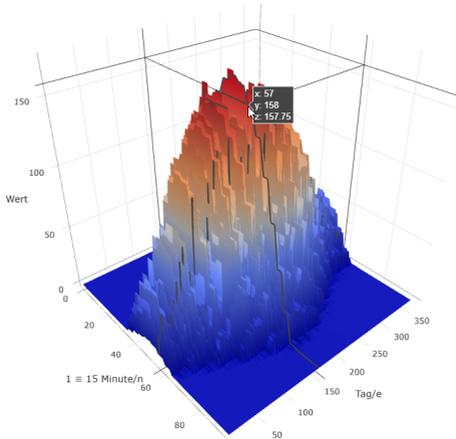


Abbildung 8.5.: 3D-Darstellung von Zeitreihen. Eigene Darstellung.

(2) dem Datenintegrationsdienst und (3) dem Datenverwaltungsdienst. Der UI-Dienst (1) basiert auf NodeJS¹¹ und stellt eine webbasierte grafische Benutzeroberfläche zur Verfügung. Der Backend-Service (2) – implementiert mit Jersey¹² – speichert Datenworkflows und verwaltet Simulationsläufe. Das Job-Management-Modul startet in einem anderen Prozess zusammen mit Job-Parametern. Daher sind Simulationsläufe von der Softwareumgebung isoliert und können auf verschiedenen Rechenknoten ausgeführt werden. Der Datenbankdienst (3) basiert auf dem Datenbanksystem MariaDB¹³.

Danksagung

Dieser Beitrag wurde finanziert durch das Projekt „Smart Utilities and Sustainable Infrastructure Change“ (Antragsnummer 100378087 (SAB)).

¹¹Siehe <https://nodejs.org/de/about/>.

¹²Siehe <https://projects.eclipse.org/projects/ee4j.jersey/>.

¹³Siehe <https://mariadb.org/>.

Diese Maßnahme wird mitfinanziert durch Steuermittel auf der Grundlage des vom Sächsischen Landtag beschlossenen Haushaltes.



DOI: <https://doi.org/10.30819/5413.08>

Literatur

- Bruckner, T. J. C. (1997). »Dynamische Energie- und Emissionsoptimierung regionaler Energiesysteme«. Diss. Uni Würzburg.
- Czarnecki, K. (2004). »Overview of Generative Software Development«. In: UPP'04. Le Mont Saint Michel, France: Springer-Verlag, S. 326–341. ISBN: 3540278842. DOI: 10.1007/11527800_25. URL: https://doi.org/10.1007/11527800_25.
- Johanning, S., F. Scheller, D. Abitz, C. Wehner und T. Bruckner (2020). »A modular multi-agent framework for innovation diffusion in changing business environments: conceptualization, formalization and implementation«. In: *Complex Adaptive Systems Modeling* 8.1. DOI: 10.1186/s40294-020-00074-6.
- Kühne, S., F. Scheller, H. Kondziella, D. G. Reichelt und T. Bruckner (2019). »Decision support system for municipal energy utilities: Approach, architecture, and implementation«. In: *Chemical Engineering & Technology* 42,9, S. 1914–1922. DOI: 10.1002/ceat.201800665.
- Scheller, F., B. Burgenmeister, H. Kondziella, S. Kühne, D. G. Reichelt und T. Bruckner (2018). »Towards integrated multi-modal municipal energy systems: An actor-oriented optimization approach«. In: *Applied Energy* 228, S. 2009–2023. ISSN: 0306-2619. DOI: 10.1016/j.apenergy.2018.07.027. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0306261918310559>.
- Scheller, F., R. Burkhardt, R. Schwarzeit, R. McKenna und T. Bruckner (2020). »Competition between simultaneous demand-side flexibility options: the case of community electricity storage systems«. In: *Applied Energy* 269, S. 114969. DOI: 10.1016/j.apenergy.2020.114969.
- Scheller, F., J. Krone, S. Kühne und T. Bruckner (2018). »Provoking residential demand response through variable electricity tariffs—a model-based assessment for municipal energy utilities«. In: *Technology and Economics of Smart Grids and Sustainable Energy* 3.1, S. 1–20.
- Scheller, F., D. G. Reichelt, S. Dienst, S. Johanning, S. Reichardt und T. Bruckner (2017). »Effects of implementing decentralized business models at a neighborhood energy system level: A model based cross-sectoral analysis«. In: *2017 14th International Conference on the European Energy Market (EEM)*. IEEE, S. 1–6. DOI: 10.1109/EEM.2017.7981910.
- Stadler, M., M. Groissböck, G. Cardoso und C. Marnay (2014). »Optimizing Distributed Energy Resources and building retrofits with the strategic DER-CAModel«. In: *Applied Energy* 132, S. 557–567. ISSN: 0306-2619. DOI: 10.1016/j.apenergy.2014.07.041. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0306261914007235>.

IRPsim – Eine Softwareumgebung zur Kopplung von Energiesystemmodellen

David Georg Reichelt^{1,2}, Stefan Kühne^{1,2}, Andreas Kluge^{1,2}, Moritz Engelmann^{1,2}

Highlights

- Um die Vorteile der energiewirtschaftlichen Modelle IRPopt und IRPact zu kombinieren, wurde die Kopplung der Modelle technisch ermöglicht. Hierfür wurde eine Ausführungsumgebung entwickelt, die den automatisierten Parameteraustausch ermöglicht.
- Die Realisierung der Modellkopplung erforderte die Einführung von Konventionen, bspw. Namens- und Typgleichheit von Austauschparametern. Daneben wurde die Modellausführung so angepasst, dass nur Modelljahre berechnet werden, deren Eingabedaten bereits vollständig erzeugt wurden.
- Durch die Modellkopplung von IRPopt und IRPact ist es möglich, die reale Entwicklung von Geschäftsmodellen und Adaptionprozessen aus techno- und sozio-ökonomischer Perspektive ganzheitlich abzubilden.
- Zukünftig wird es durch die erstellte Infrastruktur möglich, alle Modelle zu koppeln, die die geforderten Konventionen erfüllen.

¹Universitätsrechenzentrum Leipzig, Universität Leipzig

²Institut für Angewandte Informatik e. V.

Einführung

Energiesystemmodelle bilden Ausschnitte eines Modellierungskontextes energetischer Sektoren für einen bestimmten Zweck ab. Die Energiesystemmodelle IRPopt³ und IRPact⁴ stellen hierfür Beispiele für Optimierungsansätze bzw. agentenbasierte Modelle dar. Letzteres wurde im Rahmen des Projektes 'Smart Utilities and Sustainable Infrastructure Change' SUSIC am Institut für Infrastruktur und Ressourcenmanagement der Universität Leipzig und dem Institut für Angewandte Informatik e.V. (InfAI) entwickelt. Der mit einem Modell gewählte Betrachtungsgegenstand, d. h. die auf einem bestimmten Abstraktionsniveau repräsentierten Objekte, Beziehungen und Attribute, korrespondiert eng mit dem intendierten Modellnutzen, bspw. der fokussierten Forschungsfrage der Anwendungsfälle. Sie beeinflussen jedoch auch die Einsatzbedingungen sowie den für die Anwendung erforderlichen Aufwand.

Durch die Erstellung spezialisierter Modelle für verschiedene Bereiche wird es möglich, verschiedene Sichten auf eine Domäne, verschiedene Abstraktionsgrade oder verschiedene Forschungsfragen vertieft zu betrachten. Durch die Modellierung einzelner Teilbereiche der Realität lassen sich die einzelnen Modelle einfacher anwenden, erhalten größere Flexibilität und die Wartbarkeit der Modelle wird vereinfacht.⁵

Durch eine Modellkopplung zweier oder mehrerer Modelle eröffnet sich das Potenzial, die Vorteile der jeweiligen Modelle zu kombinieren bzw. die jeweiligen Nachteile auszugleichen. Wene⁶ unterscheidet zur Modellkopplung zwei grundsätzliche Ansätze: Weiche Kopplung (engl. *soft-linking*) und harte Kopplung (engl. *hard-linking*). Bei der weichen Kopplung wird der Austausch von Informationen zwischen den Modellen extern organisiert, bspw. durch den Benutzer oder die Ausführungsumgebung. Bei der harten Kopplung ist der Integrationsgrad der Modelle höher und der Datenaustausch ist integraler Teil der Modelle.

Eine Zielsetzung in SUSIC war es, das bestehende Modell IRPopt, welches eine techno-ökonomische Sicht auf Energiesysteme repräsentiert, mit

³Vgl. Scheller, Burgenmeister u. a., 2018.

⁴Vgl. Johanning u. a., 2020.

⁵Vgl. Kiss u. a., 2020; Messner und Schrattenholzer, 2000.

⁶Vgl. Wene, 1996.

der sozio-ökonomischen Sicht von IRPact zu kombinieren, um so eine techno-sozio-ökonomische Perspektive zu ermöglichen. Die Modelle sollten weiterhin eigenständig anwendbar, wartbar und evaluierbar sein. Für die Simulationsumgebung IRPsim wurde daher der Ansatz der weichen Kopplung gewählt. Da manuelle Aufwände, bspw. die manuelle Übertragung von Ein- und Ausgabedaten, aufwändig und fehleranfällig sind, sollte die IRPsim-Infrastruktur so angepasst werden, dass eine automatisierte, gekoppelte Ausführung der Modelle möglich ist. Die fachliche Eignung und Vorteile der Einzelmodelle und auch der Modellkopplung wurden ausführlich in Scheller et al.⁷ beschrieben.

In diesem Beitrag wird die Realisierung der automatisierten Modellkopplung in IRPsim beschrieben. Hierfür werden im Folgenden die Anforderungen an die Modellkopplung sowie Besonderheiten der technischen Umsetzung dargestellt. Abschließend wird eine kurze Zusammenfassung gegeben.

Anforderungen

Um den Austausch der Modelldaten zu automatisieren sind deren Ein- und Ausgabedatenstruktur und der Ausführungsprozess zentral. Die Eigenschaften der beteiligten Modelle sind in Tabelle 9.1 zusammengefasst.

Während IRPopt mit techno-ökonomischen Daten parametrisiert wird (siehe Modellgleichungen⁸ und z. B. die Optimierungs-/ Anwendungsbeispiele Nachbarschaftsspeicher⁹ und Lastverschiebung¹⁰), nutzt IRPact sozio-ökonomische Parameter (siehe Modellgleichungen¹¹). Die zentrale, für IRPact nutzbare Ausgabe von IRPopt sind die Profitabilitätsindizes einzelner Technologien, um die tatsächliche Wirtschaftlichkeit der adoptierten Anlagen zu betrachten. Um die Rentabilität einzelner Geschäftsmodelle und Auswirkungen der Adoption dezentraler Anlagen der Prosumenten

⁷Vgl. Scheller, Johanning u. a., 2018.

⁸Vgl. Scheller, Burgenmeister u. a., 2018.

⁹Vgl. Scheller, Burkhardt u. a., 2020.

¹⁰Vgl. Scheller, Krone u. a., 2018.

¹¹Vgl. Johanning u. a., 2020.

Tabelle 9.1.: Eigenschaften der betrachteten Modelle.

Modell	IRPopt	IRPact
Domäne	Energy Dispatch Modellierung	Techn. Diffusion Modellierung
Eingaben	Techno-ökonomische Parameter	Sozio-ökonomische Parameter
Ausgaben	Profitabilitätsindizes	Adaptionsraten
Zeitliche Auflösung	15 Minuten oder eine Stunde	Konfigurierbar Ergebnisdaten: Jährlich
Modellierungssprache	GAMS	Java

(Prosumer)¹² auf das Kerngeschäft von Versorgungsunternehmen zu prognostizieren, muss bekannt sein, wie stark einzelne Technologien von den Prosumern genutzt werden. Daher sind die Adoptionsraten die zentralen Ausgaben von IRPact, die in IRPopt weitergenutzt werden können.

IRPopt kann ein Szenario in einer vierstündlichen oder stündlichen Auflösung berechnen. Es wird standardmäßig für einen Betrachtungszeitraum von einem ganzen Jahr (Optimierungsjahr) ausgeführt. Weitere Optimierungsjahre werden anschließend, ggf. parallel berechnet. IRPact erlaubt eine beliebige diskrete Auflösung (standardmäßig wöchentliche Auflösung) und wird in Jahresscheiben ausgeführt. Um den Zustand der Akteure zu behalten, wird IRPact normalerweise kontinuierlich ausgeführt. Um eine weiche Kopplung der Modelle über Parameteraustausch zu ermöglichen, muss die Ausführung beider Modelle so angeglichen sein, dass ein sinnvoller Datenaustausch möglich ist.

Fachlich wie technisch ist eine Modellsynchronisation nach jährlichen Betrachtungszeiträumen sinnvoll. Die Berechnung von Optimierungsjahren kann so in IRPopt beibehalten werden. Die in IRPact berechneten Adaptionsraten bilden die Basis für folgende IRPopt-Optimierungsjahre, während die in IRPopt berechneten Profitabilitätsindizes wiederum eine Eingabe für den nächsten Betrachtungszeitraum in IRPact bilden.

¹²Ein Prosumert ist ein Verbraucher (Konsument), der gleichzeitig Produzent ist.

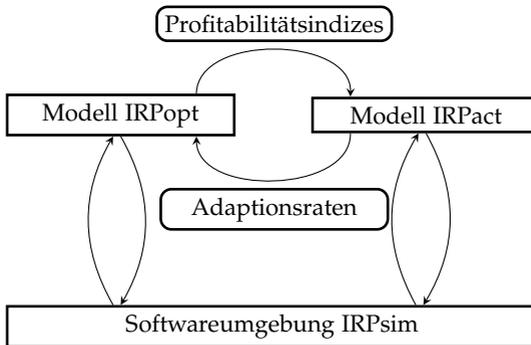


Abbildung 9.1.: Weiche Kopplung der Modelle IRPopt und IRPact in IRPsim. Eigene Darstellung nach Reichelt u. a., 2021.

Auf Basis dieser grundlegenden Entscheidung wurden folgende technische Anforderungen an die Ausführungsumgebung spezifiziert:

- Es werden alle Ausgabedaten weitergegeben, die in der Menge der Ausgabedaten eines Modells sind und gleichzeitig in den Eingabedaten des anderen Modells. Hierfür werden die mit *par_out_X* markierten Parameter eines Modells mit den Eingabedaten (*par_X*) des anderen Modells verglichen.
- Für die gekoppelte Ausführung werden gleiche Eingabedaten stets gleichgesetzt, d. h. wenn derselbe Parameter *par_X* in IRPopt und IRPact benutzt wird, garantiert die Simulationsumgebung, dass dieser mit den gleichen Daten aus der Datenbank parametrisiert wird.

Abbildung 9.1 fasst den Datenaustausch zwischen den gekoppelten Modellen zusammen.

Umsetzung

Für die Umsetzung der Modellkopplung sind drei Schritte erforderlich: Die Implementierung der Parametrisierung und des Parameteraustauschs, die Anpassung der Modellausführung und die Modellverknüpfung. Diese werden im Folgenden dargestellt.

Parametrisierung und Parameteraustausch

Grundlage der Implementierung des Parameteraustauschs bildet der oben beschriebene *Prozess*. Dabei sind einige *Besonderheiten für IRPact* zu beachten. Darüber hinaus wurde das zentrale Artefakt der *SyncableParameter* definiert. Diese Teilbereiche werden im Folgenden dargestellt.

Prozess Die Parametrisierung erfolgt initial mit der Auswertung von Eingaben aus der Weboberfläche (technisch: Parsen einer JSON-Struktur vom Frontend). Dadurch entstehen je Job ein oder mehrere Optimierungsjahr(e). Bei Abarbeitung des Jobs wird je Optimierungsjahr geprüft, ob bereits ein vorheriges Optimierungsjahr berechnet wurde, d. h. ob demnach beim aktuellen Optimierungsjahr Parameter überschrieben werden müssen. Die Prüfung erfolgt in drei Schritten:

1. Zunächst wird geprüft, ob es sich bei dem vorherigen Modell und dem aktuellen um eine erlaubte Kopplung handelt – gegenwärtig ist in IRPsim nur die Kopplung zwischen IRPopt und IRPact sowie von IRPact zu IRPact erlaubt. Die Kopplung eines Modells mit sich selber beschreibt dabei die Weitergabe von Ausgabedaten der Vorjahre an zukünftige Modellausführungen.
2. Im Anschluss wird geprüft, ob sich die Modelldefinitionen unterscheiden. In diesem Fall werden die Eingabe-Parameter je Typ anhand einer vorher ermittelten validen Menge von Parametern (siehe *SyncableParameter*) überschrieben, anschließend werden die Output-Parameter des Vorgänger-Optimierungsjahres als Eingabe-Parameter des aktuellen Optimierungsjahrs übertragen.
3. Im Fall, dass das aktuelle berechnete Modell IRPact ist, werden zusätzlich die Output-Parameter des vorher berechneten IRPact-Modells als Eingabe-Parameter weiterverwendet, das heißt es wird zusätzlich geprüft, ob bereits ein IRPact-Jahr vor dem aktuellen Ausführungsjahr existiert.

Besonderheiten für IRPact Ein IRPact-Modell benötigt die Daten des vorherigen IRPact-Jahreslaufs zur Initialisierung der Agentenzustände. Für die Umsetzung existiert dafür die Datenstruktur *Set set_BinaryPersistData*, welche die Zustände aller bisherigen Akteure beinhaltet. Dieses *Set* ist

sowohl als Eingabe-Parameter als auch als Ausgabe-Parameter in der Modelldefinition definiert. Der Inhalt und die Identifikatoren werden dynamisch im IRPact-Modell zur Laufzeit erzeugt. Dadurch müssen alle Bezeichner algorithmisch in der Eingabe-Struktur erzeugt werden, bevor diese übertragen werden können.

SyncableParameter Damit Parameter zwischen Modellen übertragen werden können, müssen sie hinsichtlich ihrer Namen sowie ihrer Typen übereinstimmen. Beispielsweise muss der Parameter `sca_Tax_PS_vat` in beiden Modellen als Eingabe-Parameter, des Typs *Skalar* vorhanden sein, damit dieser übertragen werden kann. Im Fall einer Übertragung von Ausgabe- zu Eingabe-Parametern, wie beispielsweise `par_out_IuO_ESector_CustSide` in IRPopt nach `par_IuO_ESector_CustSide` in IRPact, muss der Name und Typ, abzüglich des `'_out_'`-Namenbestands übereinstimmen.

SyncableParameter beschreiben eine Sammlung von Parametern, welche in jeweils zwei Modellen in den möglichen Konstellationen INPUT, OUTPUT und OUTPUT_TO_INPUT vorhanden sind. Diese Konstellationen werden als *ConnectionType* bezeichnet. Je *ConnectionType* werden alle Parameternamen des ersten Modells mit denen des zweiten Modells verglichen. Übereinstimmungen werden daraufhin auf Typengleichheit geprüft. Stimmen sowohl Name als auch Typ überein, wird dieser Parameter als Teil der SyncableParameter für diesen *ConnectionType* angesehen.

Für OUTPUT_TO_INPUT muss zusätzlich der Parametername manipuliert werden, da beim Namensvergleich der Bestandteil `'_out_'` im Parameternamen entfernt und beim Vergleich des Typs wieder hinzugefügt werden muss. Die SyncableParameter werden für jede Modellkombination erzeugt und müssen nur bei ihrer Erstverwendung ausgewertet werden.

Modellausführung

Nachdem die entsprechenden Parameter gesetzt sind, wird die Eingabe-Konfiguration serialisiert und an die modellspezifische Ausführungsumgebung übertragen. Für IRPopt wird die Eingabe-Konfiguration im GDX-

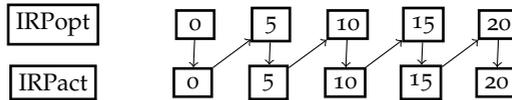


Abbildung 9.2.: Abhängigkeiten der Ausführungsjahre voneinander, wobei eine Ausführung mit Stützjahren in jedem fünften Jahr gewählt wurde. Quelle: Reichelt u. a., 2021.

Format¹³ an die Ausführungsumgebung GAMS¹⁴ übergeben. Die Java¹⁵-basierte Agentensimulation IRPact ist als Jar-Softwarepaket¹⁶ verfügbar. Die Eingabekonfiguration wird als JSON¹⁷ bereitgestellt und anschließend vom Modell selbst importiert.

Die Ausführung der jeweiligen Modelljahre kann dabei nur erfolgen, wenn das jeweilige Vorgängermodell bzw. das jeweilige Vorgängerjahr berechnet wurde. Um Berechnungszeit zu sparen, wird in der Regel nur jedes n -te Jahr, bspw. jedes fünfte Jahr, berechnet. Die berechneten Jahre werden Stützjahre genannt. Zwischen den Stützjahren liegende Jahre werden interpoliert. Daraus ergibt sich die in Abbildung 9.2 dargestellte Abhängigkeit der Modelljahre voneinander. Eine Parallelisierung der Berechnung einzelner Jahre ist dadurch nicht mehr möglich.

Modellverknüpfung

Um konkrete Modellverknüpfungen zu definieren, wird in der Liste der Modelldefinitionen (`models.json`) ein Modell hinzugefügt, das keinen Quelltext enthält und stattdessen eine Liste von Untermodell-IDs referenziert. Diese Information wird anschließend vom Front- und Backend verwendet, um die Modellverknüpfung darzustellen und bei der Ausführung zu ermöglichen. Dies ist, über die aktuelle Verknüpfung von IRPopt und IRPact hinausgehend, für beliebige weitere Modelle möglich.

¹³Siehe https://www.gams.com/latest/docs/UG_GDX.html.

¹⁴Siehe <https://www.gams.com/>.

¹⁵Siehe <https://www.java.com/de/>.

¹⁶Siehe <https://docs.oracle.com/javase/tutorial/deployment/jar/basicsindex.html>.

¹⁷Siehe <https://www.json.org/json-en.html>.

Zusammenfassung

Für die Kopplung verschiedener Energiesystemmodelle wurde in IRPsim die Möglichkeit zur weichen Kopplung über einen automatisierten, synchronisierten Parametertausch implementiert. Die Kopplung wurde exemplarisch anhand der Modelle IRPopt und IRPact erprobt. Dabei werden die durch IRPopt berechneten Profitabilitätsindizes an IRPact übergeben und die von IRPact ermittelten Adaptionraten an IRPopt zurückgegeben. Die Realisierung der Modellkopplung erforderte die Einführung von Konventionen, bspw. Namens- und Typpleichheit von Austauschparametern. Daneben wurde die Modellausführung so angepasst, dass nur Modelljahre berechnet werden, deren Eingabedaten bereits vollständig erzeugt wurden.

Durch die Modellkopplung von IRPopt und IRPact ist nun möglich, die reale Entwicklung von Geschäftsmodellen und Adoptionsprozessen aus techno- und sozio-ökonomischer Perspektive ganzheitlich abzubilden.

Die Inhalte dieses Kapitels wurden bereits auf der Konferenz INFORMATI-K 2020 publiziert.¹⁸

Danksagung

Dieser Beitrag wurde finanziert durch das Projekt „Smart Utilities and Sustainable Infrastructure Change“ (Antragsnummer 100378087 (SAB)).

Diese Maßnahme wird mitfinanziert durch Steuermittel auf der Grundlage des vom Sächsischen Landtag beschlossenen Haushaltes.



DOI: <https://doi.org/10.30819/5413.09>

¹⁸Vgl. Reichelt u. a., 2021.

Literatur

- Johanning, S., F. Scheller, D. Abitz, C. Wehner und T. Bruckner (2020). »A modular multi-agent framework for innovation diffusion in changing business environments: conceptualization, formalization and implementation«. In: *Complex Adaptive Systems Modeling* 8.1. DOI: 10.1186/s40294-020-00074-6.
- Kiss, B., E. Kácsor und Z. Szalay (2020). »Environmental assessment of future electricity mix – Linking an hourly economic model with LCA«. In: *Journal of Cleaner Production* 264, S. 121536. ISSN: 0959-6526. DOI: 10.1016/j.jclepro.2020.121536.
- Messner, S. und L. Schrattenholzer (2000). »MESSAGE-MACRO: linking an energy supply model with a macroeconomic module and solving it iteratively«. In: *Energy* 25.3, S. 267–282. ISSN: 0360-5442. DOI: 10.1016/S0360-5442(99)00063-8.
- Reichelt, D. G., S. Kühne, F. Scheller, D. Abitz und S. Johanning (2021). »Towards an infrastructure for energy model computation and linkage«. In: *INFORMATIK 2020*.
- Scheller, F., B. Burgenmeister, H. Kondziella, S. Kühne, D. G. Reichelt und T. Bruckner (2018). »Towards integrated multi-modal municipal energy systems: An actor-oriented optimization approach«. In: *Applied Energy* 228, S. 2009–2023. ISSN: 0306-2619. DOI: 10.1016/j.apenergy.2018.07.027. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0306261918310559>.
- Scheller, F., R. Burkhardt, R. Schwarzeit, R. McKenna und T. Bruckner (2020). »Competition between simultaneous demand-side flexibility options: the case of community electricity storage systems«. In: *Applied Energy* 269, S. 114969. DOI: 10.1016/j.apenergy.2020.114969.
- Scheller, F., S. Johanning und T. Bruckner (2018). *IRPsim: A techno-socio-economic energy system model vision for business strategy assessment at municipal level*. Techn. Ber. Beiträge des Instituts für Infrastruktur und Ressourcenmanagement. URL: <http://hdl.handle.net/10419/183217>.
- Scheller, F., J. Krone, S. Kühne und T. Bruckner (2018). »Provoking residential demand response through variable electricity tariffs—a model-based assessment for municipal energy utilities«. In: *Technology and Economics of Smart Grids and Sustainable Energy* 3.1, S. 1–20.
- Wene, C.-O. (1996). »Energy-economy analysis: Linking the macroeconomic and systems engineering approaches«. In: *Energy* 21.9, S. 809–824. ISSN: 0360-5442. DOI: 10.1016/0360-5442(96)00017-5.

Teil IV.

Empirische Untersuchungen

Empirische Verankerung der Haushaltsagenten und ihres Photovoltaik-Investitionsverhaltens

Emily Schulte¹, Fabian Scheller²

Highlights

- Theoretisch fundierte Entscheidungslogiken erfordern im Rahmen praxisrelevanter Entscheidungssimulationen mit heterogenen Agenten eine empirische Fundierung.
- In Zusammenarbeit mit Sinus Sociovision wurde eine Umfrage (N=1800) durchgeführt, um Agentengruppen zu charakterisieren und die Entscheidungslogik zu parametrisieren.
- Sinus Milieus unterscheiden sich bezüglich ihrer Innovationsaffinität und Kommunikativität sowie der Größe ihrer sozialen Netzwerke.
- Die Absicht, eine PV-Anlage zu kaufen, wird maßgeblich durch die finanzielle Bewertung und die Innovationsaffinität bestimmt; zudem verfügen Haushalte mit hoher Kaufabsicht über höhere Einkommen als Haushalte mit niedriger Kaufabsicht.

Einleitung

Das im Rahmen des Projektes 'Smart Utilities and Sustainable Infrastructure Change' (SUSIC) entwickelte Modellframework IRPact soll dazu

¹Institut für Infrastruktur und Ressourcenmanagement, Universität Leipzig

²Department of Technology, Management and Economics, Technical University of Denmark

dienen, die dezentralen Entscheidungen von Haushalten über Niedrigemissionstechnologien innerhalb eines räumlichen Gebietes im Zeitverlauf abzubilden. In der daraus abgeleiteten, konkretisierten Modellinstanz PVact wird die Entscheidung eines Agenten für oder gegen eine PV Anlage als Prozess mit sechs Zuständen (Z1-Z6) abgebildet (siehe Kapitel zu Haushaltsentscheidungen in diesem Band). Eine vereinfachte Version des Prozesses ist in Abbildung 10.1 dargestellt. Die Wohnorte der betrachteten Agenten entsprechen den zu Wohnzwecken genutzten Adressen im zu untersuchenden Gebiet.

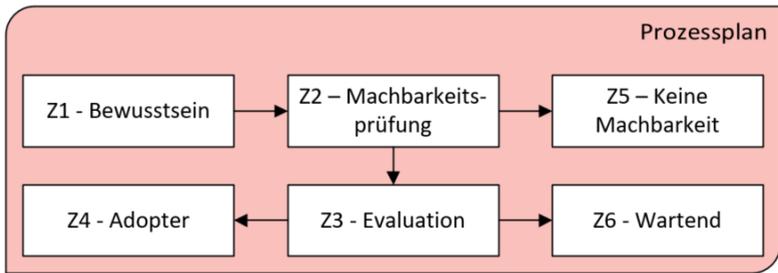


Abbildung 10.1.: Vereinfachter Prozessplan für die Agenten in der Simulationssoftware PVact. Eigene Darstellung.

Der Prozess beginnt mit dem initialen Wissen der Agenten darüber, dass Aufdach-Photovoltaikanlagen auf privaten Hausdächern installiert werden können (Z1). In diesem Zustand kommunizieren die Agenten innerhalb ihres sozialen Netzwerkes und generieren darüber möglicherweise ein grundsätzliches Interesse an Photovoltaikanlagen, das in seiner Ausprägung im Zeitverlauf wachsen kann. Überschreitet das Interesselevel (d.h. das Maß für die Ausprägung des aktuell vorhandenen Interesses an dem Erwerb einer PV-Anlage) den Interessenschwellenwert, prüft der Agent, ob er Entscheidungskompetenz in Bezug auf Photovoltaikanlagen hat (Z2). Über Entscheidungskompetenz verfügen im Kontext der von uns betrachteten privat zu errichtenden Anlagen nur private Ein- und Zweifamilienhäuser, welche nach erfolgreicher Prüfung eine Evaluierung vornehmen (Z3). Das Ergebnis wird mit einem für das Modell gesetzten Adoptionsschwellenwert verglichen. Zudem wird das Einkommen der Agenten mit einem finanziellen Schwellenwert verglichen. Überschreiten die Bewertung und

das Einkommen die Schwellenwerte, adoptiert der Agent (Z4). Die Evaluierung findet im Rahmen einer Nutzwertgleichung statt, welche die finanzielle Bewertung ($U_f(i)$), die Innovationsaffinität ($U_{ns}(i)$) und das Umweltbewusstsein ($U_{ec}(i)$) des Agenten, sowie den sozialen ($U_s(i)$) und räumlichen Druck ($U_l(i)$) eine PV-Anlage zu kaufen berücksichtigt. Das Ergebnis der Evaluierung ist der agentenspezifische gewichtete Nutzen der fünf Komponenten $U(i)$.

$$U(i) = w_{NPV} * U_f(i) + w_s * U_{soc}(i) + w_{loc} * U_l(i) + w_{ec} * U_{ec}(i) + w_{ns} * U_{ns}(i) \quad (10.1)$$

Während die Gewichte der Komponenten (w_{NPV} , w_{soc} , w_{loc} , w_{ec} , w_{ns}) einheitlich festgelegt sind, sind die Komponenten agentenspezifisch und zeitvariabel.

Verfügt ein Agent nicht über Entscheidungskompetenz, oder entscheidet er sich gegen eine Photovoltaikanlage, wird er in den Zustand Z5 (Keine Machbarkeit) oder Z6 (Wartend) versetzt. Beide Phasen sind ausgestaltet wie Z1, zusätzlich finden in Z6 regelmäßige Re-Evaluationen statt.

Um ein lauffähiges Modell zu erhalten, müssen die den dargestellten Mechanismen zugrunde liegenden Variablen erhoben werden.

Um dem Anspruch eines theoretisch und empirisch fundierten Modells mit heterogenen Agenten gerecht zu werden, werden die sogenannten Sinus Milieus³ hinzugezogen. Die aus der Sozial- und Marktforschung stammende Segmentierung basiert auf einem sozialen Milieuansatz, der Milieus, die als Gruppen von Gleichgesinnten bezeichnet werden können, anhand von sozialem Status, Lebensstil und Grundwerten gruppiert. Sinus Milieus eignen sich für die Verwendung in PVact, da sie als Schnittstelle zwischen räumlichen und empirischen Daten fungieren können. Im Rahmen des Projektes wurden adressspezifische Daten über Milieuzugehörigkeit und Einkommen der Bewohner und der Anzahl von Haushalten für den Modellierungskontext erworben, welche sich mit adressspezifischen Daten zu Gebäudecharakteristika und Eigentübertyp verschneiden lassen (siehe Kapitel zu den Fallstudien in diesem Band). Somit können fallstudien-spezifische, reale Daten in PVact integriert werden. Zudem gehört folglich jeder Agent in PVact zu einem Sinus Milieu, worüber den Agenten weitere

³Siehe <https://www.sinus-institut.de/>.

relevante Eigenschaften zugewiesen werden können, die im Rahmen einer empirischen Umfrage pro Milieu ermittelt werden. Dazu gehören Umweltbewusstsein, Innovationsaffinität, Kommunikativität, sowie die Größe und Homogenität des sozialen Netzwerkes.

Ziel: Um das Simulationsmodell nicht nur theoretisch (siehe Kapitel zu Haushaltsentscheidungen in diesem Band), sondern auch empirisch zu fundieren und heterogene Agenten zu erzeugen wird eine weitreichende empirische Verankerung der Modellparameter vorgenommen.

Dazu sollen im Rahmen einer repräsentativen Umfrage (1) heterogene Agentengruppen charakterisiert, (2) die Gewichte der Komponenten der Nutzwertfunktion und (3) der finanzielle Schwellenwert bestimmt werden.

Methode

Aufgrund der beabsichtigten Integration von Sinus Milieus in PVact wurde die oben angesprochene empirische Fundierung auf der Basis einer Umfrage realisiert, die in Zusammenarbeit mit der SINUS Markt- und Sozialforschung GmbH durchgeführt. Die Online-Umfrage wurde von 1,800 Hauseigentümern, die an investitionsbezogenen Entscheidungen beteiligt und zwischen 18 und 75 Jahren alt sind, zwischen dem 13. und 31. Mai 2021 beantwortet. Diese nachfolgend vorgestellte zweite Umfrage baut dabei auf den Erkenntnissen einer ersten Umfrage und aus der Literatur auf.⁴

Durch einen statistischen Vergleich des Samples mit dem Best for Planning Tool⁵ konnte festgestellt werden, dass das Sample repräsentativ für die Gruppe von Gebäudeeigentümern in Bezug auf Altersgruppe, Geschlecht und Bundesland ist. Dies könnte damit zusammenhängen, dass die Studie sich um eine innovative, kostspielige Technologie dreht, für die sich, sowohl nach der theoretischen Diffusionstheorie, als auch nach zahlreichen empirischen Studien eher Menschen aus gehobeneren sozialen

⁴Vgl. Scheller, Doser, Schulte u. a., 2021; Scheller, Doser, Sloot u. a., 2020; Scheller, Graupner, Edwards, Johanning u. a., 2022; Scheller, Graupner, Edwards, Weinand u. a., 2022; Schulte, Scheller, Pasut u. a., 2022; Schulte, Scheller, Sloot u. a., 2022

⁵Siehe <https://gik.media/best-4-planning/>.

Milieus interessieren.⁶ Da die Abweichung in der Milieuverteilung somit den Erwartungen der Wissenschaftler:innen entspricht, wird das Sample als hinreichend repräsentativ bewertet und kann für die weitere Analyse verwendet werden.

Zur Auswertung der Daten wurde Stata 14.2⁷ verwendet. Daten wurden mithilfe einer Likert-Skala von 1 (Ablehnung) bis 7 (Zustimmung) erhoben und im Rahmen der Berechnungen auf Werte von 0-1 skaliert.

Auswertung

Zunächst wurde untersucht, ob und wie sich die Sinus Milieus in ihrem **Umweltbewusstsein**, ihrer **Innovationsaffinität**, der **Größe und Homogenität** ihrer sozialen Netzwerke und ihrer **Kommunikativität** unterscheiden. Dazu wurden Methoden der Varianzanalyse verwendet, welche es erlauben, Unterschiede zwischen den Mittelwerten der unabhängigen Variablen zu erkennen. Dieses zeigte, dass sich die Mittelwerte zahlreicher Milieus signifikant voneinander unterscheiden ($p < 0,05$)⁸, dass also einzelne Milieus tatsächlich stärker oder weniger umweltbewusst oder innovationsaffin sind, unterschiedlich große soziale Netzwerke haben, und kommunikativer oder weniger kommunikativ sind. Wie in Tabelle 10.1 ersichtlich wird, geht eine stärkere Innovationsaffinität häufig mit größeren sozialen Netzwerken und einer ausgeprägteren Kommunikativität einher. In Bezug auf das Umweltbewusstsein sind weniger starke Unterschiede zu bemerken, die sich auch nicht in einen Zusammenhang zu den anderen drei Variablen bringen lassen.

Als zweites wurden die Gewichte der fünf Komponenten der Entscheidungsfunktion bestimmt. Die Entscheidungsfunktion ist eine Nutzwertfunktion, die sich aus der gewichteten Summe von fünf Komponenten (dem Umweltbewusstsein, der Innovationsaffinität, der finanziellen Bewertung einer PV-Anlage auf dem eigenen Dach, und dem räumlichen

⁶Vgl. Gellrich, 2016; Kleinhüchelkotten, 2005; Rogers, 2003.

⁷Siehe <https://www.stata.com/>.

⁸Der p-Wert zeigt, wie hoch die Wahrscheinlichkeit ist, dass die untersuchten Unterschiede alleine auf Zufall beruhen. Üblicherweise wird ein p-Wert $< 0,05$ als signifikant interpretiert, d.h., die Unterschiede beruhen nicht auf Zufall.

Tabelle 10.1.: Mittelwerte der 10 Sinus Milieus, bezogen auf eine Skala von 0-1

	Innovations- affinität	Umwelt- bewusstsein	Netzwerk- größe	Kommuni- kativität
Performer	0,538	0,750	0,528	0,656
Adaptiv Pragmatische	0,494	0,738	0,480	0,663
Hedonisten	0,476	0,686	0,487	0,632
Konservativ Etablierte	0,470	0,722	0,510	0,627
Expeditive	0,459	0,747	0,469	0,646
Liberal-Intellektuelle	0,440	0,747	0,522	0,625
Bürgerliche Mitte	0,418	0,721	0,426	0,590
Sozial Ökologische	0,371	0,788	0,442	0,588
Traditionelle	0,336	0,746	0,397	0,533
Prekäre	0,334	0,695	0,366	0,444

und sozialen Druck) zusammensetzt. Eine lineare Regression⁹, in der der Einfluss der fünf Komponenten auf die angegebene Kaufabsicht berechnet wurde, konnte 40% der Varianz¹⁰ in der Kaufabsicht erklären (siehe Tabelle 10.2), was in einem ähnlichen Rahmen liegt wie die Analysen von Korcaj¹¹ und Engelken¹². Den stärksten Einfluss auf die Kaufabsicht hat die finanzielle Bewertung, gefolgt von der Innovationsaffinität. Die Anzahl von PV-Anlagen im räumlichen Umfeld spielt eine untergeordnete, aber spürbare Rolle. PV-Anlagen im sozialen Umfeld dahingegen scheinen keinen systematischen Einfluss auf die Kaufabsicht zu haben, wie der nicht signifikante p-Wert zeigt. Umweltbewusstsein hat einen sehr kleinen, wenn auch signifikanten negativen Einfluss auf die Kaufabsicht.

Die Ergebnisse passen zu der im Rahmen des Projektes durchgeführten Meta-Analyse zur Absicht von Haushalten, in eine PV-Anlage zu investieren, in der ebenfalls kein signifikanter Effekt von sozialer Norm und ein schwach negativer, bedingt signifikanter Effekt von Umweltbewusstsein ($\beta = -0,049$, $p = 0,078$) gezeigt wurde.¹³ Auch in der Meta-Analyse haben die Wahrnehmung von Vorteilen, einschließlich finanzieller Natur, und die Innovationsaffinität die stärkste Vorhersagekraft bewiesen.

⁹In einer linearen Regression wird versucht, eine beobachtete abhängige Variable durch eine oder mehrere unabhängige Variablen zu erklären.

¹⁰Die Varianz misst die Streuung einer Variable um ihren Mittelwert.

¹¹Vgl. Korcaj u. a., 2015.

¹²Vgl. Engelken u. a., 2018.

¹³Vgl. Schulte, Scheller, Slood u. a., 2022.

Tabelle 10.2.: Ergebnisse der linearen Regression der fünf Komponenten der Nutzwertfunktion auf die angegebene Kaufabsicht.

	Koeff.	Std. Fehl.	t	p-Wert	Beta
Innovationsaffinität	0,372	0,027	13,890	0,000	0,267
Umweltbewusstsein	-0,159	0,038	-4,200	0,000	-0,079
Finanzielle Bewertung	0,676	0,028	23,970	0,000	0,470
Sozialer Druck	0,011	0,024	0,440	0,659	0,008
Räumlicher Druck	0,181	0,028	6,520	0,000	0,126
Konstante	-0,077	0,031	-2,480	0,013	
Anzahl Beobachtungen	1800				
F(5, 1794)	238,76				
p-Wert	<0,001				
R ²	0,3996				

Insbesondere der fehlende Effekt von Umweltbewusstsein auf die Kaufabsicht wirkt überraschend, wird doch die Anschaffung von PV-Anlagen üblicherweise als grünes, umweltbewusstes Verhalten beschrieben.¹⁴ Einerseits könnte der fehlende Effekt im Design der Umfrage liegen, in der Menschen ihre Einstellung gegenüber der Umwelt selber bewerten müssen. Menschen haben die Tendenz, Umfragen auf eine sozial erwünschte Art und Weise zu beantworten, was als 'social desirability bias' bezeichnet wird.¹⁵ Dies könnte dazu führen, dass eine geringe Varianz im Sample entsteht, die wiederum einen Effekt von Umweltbewusstsein auf die abhängige Variable unwahrscheinlich macht. Andererseits konnte vielfach gezeigt werden, dass es für Akteure umso leichter ist, ihre Umwelteinstellung in entsprechende Verhaltensweisen umzuwandeln, je geringer der Kostendruck in einer Situation ist. Bei hohen Investitionskosten, wie sie auch mit der Anschaffung einer PV-Anlage verbunden sind, trägt laut der 'low-cost hypothesis' individuelles Umweltbewusstsein nicht dazu bei, Vorbehalte zu überwinden, und die Entscheidung wird von finanziellen Motiven dominiert.¹⁶ Schon in der Theorie des geplanten Verhaltens wird soziale Norm als zentraler Prädiktor für Verhaltensabsichten berücksichtigt.¹⁷ Bei der Adoption von Photovoltaikanlagen wird diese häufig in

¹⁴Vgl. Gava Gastaldo u. a., 2019; Schelly und Letzelter, 2020.

¹⁵Vgl. Grimm, 2010.

¹⁶Vgl. Trotta, 2018.

¹⁷Vgl. Ajzen, 1991, 2020.

einen aktiven und einen passiven Effekt zerlegt, wobei ersterer sich primär auf verbalen Austausch bezieht und zweiterer davon ausgeht, dass der visuelle Eindruck von PV-Anlagen zu einer wahrgenommenen sozialen Norm führt.¹⁸ In der vorliegenden Umfrage wurden die beiden Effekte operationalisiert, indem die Teilnehmer aufgefordert wurden, die absolute Anzahl von PV-Anlagen in ihrem räumlichen und sozialen Umfeld anzugeben, da sich diese Art der Messung auf das Agentenmodell übertragen lässt. Die Regression zeigt, dass die Anzahl von PV-Anlagen im räumlichen Umfeld einen direkten Effekt auf die Kaufabsicht hat, die Verbreitung im sozialen Netzwerk dagegen nicht. Ob die Einstellungen innerhalb des sozialen Netzwerkes gegenüber PV-Anlagen die Kaufabsicht beeinflussen, was eine konventionellere Art der Messung von sozialer Norm ist, wurde in diesem Rahmen nicht berücksichtigt.¹⁹ Dies geschah aus Gründen der Umsetzbarkeit im Modell, da sich die subjektive Wahrnehmung der sozialen Norm nur bedingt mit konkreten Modellparametern abbilden lässt.

Zuletzt wurde der finanzielle Schwellenwert berechnet, der als Kaufbarriere in PVact eingebaut wurde. Unterschreitet ein Agent den Schwellenwert, wird er an der Adoption gehindert, ungeachtet des Ergebnisses der Nutzwertfunktion. Um den Schwellenwert zu berechnen, wurde das Sample in zwei Gruppen geteilt: Solche Agenten mit geringer und solche mit hoher Kaufabsicht (1-4 und 5-7 auf einer 7-Punkt Likertskala). Die Gruppen wurden in Bezug auf ihr mittleres Einkommen verglichen, und ein statistisch hoch signifikanter Unterschied ($p < 0,001$) von monatlich rund 250 € konnte festgestellt werden. Während die Gruppe mit hoher Kaufabsicht monatlich über 3.750€ verfügt, sind es in der Gruppe mit geringer Kaufabsicht nur 3.501€. Als finanzieller Schwellenwert wurde das arithmetische Mittel zwischen den beiden Durchschnittswerten gewählt, also 3.625€.

Schluss

Mithilfe einer großen Umfrage (N=1800), die in Zusammenarbeit mit der SINUS Markt- und Sozialforschung GmbH durchgeführt wurde, konnten die auf den Sinus Milieus basierenden Agentengruppen charakterisiert,

¹⁸Vgl. Bollinger und Gillingham, 2012; Rai und Sigrin, 2013.

¹⁹Siehe z.B. Engelken u. a., 2018; Korcaj u. a., 2015.

die Entscheidungsfunktion mit Gewichten versehen, und ein finanzieller Schwellenwert definiert werden. Durch die starke theoretische und empirische Fundierung, und die Nähe zum modellierten Kontext durch den Einbezug realer, räumlicher Daten, ist das Modell über die Veranschaulichung klassischer Modellmechanismen hinaus dazu in der Lage, tiefgehende Erklärungen für das simulierte Verhalten der Agenten zu liefern. Somit ist auch eine detailliertere und genauere Bewertung von Politikmaßnahmen und Transformationspfaden möglich.

Danksagung

Dieser Beitrag wurde finanziert durch das Projekt „Smart Utilities and Sustainable Infrastructure Change“ (Antragsnummer 100378087 (SAB)).

Diese Maßnahme wird mitfinanziert durch Steuermittel auf der Grundlage des vom Sächsischen Landtag beschlossenen Haushaltes.



DOI: <https://doi.org/10.30819/5413.10>

Literatur

- Ajzen, I. (1991). »The Theory of Planned Behavior«. In: *Organizational Behavior and Human Decision Processes* 50, S. 179–211.
- Ajzen, I. (2020). »The theory of planned behavior: Frequently asked questions«. In: *Human Behavior and Emerging Technologies* 2.4, S. 314–324. ISSN: 2578-1863. DOI: 10.1002/hbe2.195.
- Bollinger, B. und K. Gillingham (2012). »Peer Effects in the Diffusion of Solar Photovoltaic Panels«. In: *Marketing Science* 31.6, S. 900–912. ISSN: 0732-2399. DOI: 10.1287/mksc.1120.0727.
- Engelken, M., B. Römer, M. Drescher und I. Welpel (2018). »Why homeowners strive for energy self-supply and how policy makers can influence them«. In: *Energy Policy* 117, S. 423–433. ISSN: 03014215. DOI: 10.1016/j.enpol.2018.02.026.
- Gava Gastaldo, N., G. Rediske, P. Donaduzzi Rigo, C. Brum Rosa, L. Michels und J. C. Mairesse Siluk (2019). »What is the Profile of the Investor in Household Solar Photovoltaic Energy Systems?«. In: *Energies* 12.23, S. 4451. DOI: 10.3390/en12234451.
- Gellrich, A. (2016). »Von der Minderheit zur Mehrheit? Psycho-soziale Einflüsse bei der Verbreitung klima-schonender Innovationen«. Diss. URL: <https://kobra.uni-kassel.de/handle/123456789/2016122151775>.

- Grimm, P. (2010). »Social desirability bias«. In: *Wiley international encyclopedia of marketing*.
- Kleinhückerkotten, S. (2005). »Suffizienz und Lebensstile«. In: *Ansätze für eine milieuorientierte Nachhaltigkeitskommunikation*, Berlin: Berliner Wissenschafts-Verlag GmbH.
- Korcaj, L., U. J. Hahnel und H. Spada (2015). »Intentions to adopt photovoltaic systems depend on homeowners' expected personal gains and behavior of peers«. In: *Renewable Energy* 75, S. 407–415. ISSN: 09601481. DOI: 10.1016/j.renene.2014.10.007.
- Rai, V. und B. Sigrin (2013). »Diffusion of environmentally-friendly energy technologies: buy versus lease differences in residential PV markets«. In: *Environmental Research Letters* 8.1, S. 014022. DOI: 10.1088/1748-9326/8/1/014022.
- Rogers, E. M. (2003). *Diffusion of innovations*. 5th ed. New York: Free Press. ISBN: 9780743222099.
- Scheller, F., I. Doser, E. Schulte, S. Johanning, R. McKenna und T. Bruckner (2021). »Stakeholder dynamics in residential solar energy adoption: findings from focus group discussions in Germany«. In: *Energy Research & Social Science* 76, S. 102065. ISSN: 2214-6296. DOI: 10.1016/j.erss.2021.102065.
- Scheller, F., I. Doser, D. Sloot, R. McKenna und T. Bruckner (2020). »Exploring the role of stakeholder dynamics in residential photovoltaic adoption decisions: A synthesis of the literature«. In: *Energies* 13.23, S. 6283. DOI: 10.3390/en13236283.
- Scheller, F., S. Graupner, J. Edwards, S. Johanning, C. Bergaentzlé und T. Bruckner (2022). »Social Influence Throughout the Photovoltaic Adoption Process: Exploring the Impact of Stakeholder Perceptions«. In: *Energy RESEARCH LETTERS* 3.Early View, S. 33903. DOI: 10.46557/001c.33903.
- Scheller, F., S. Graupner, J. Edwards, J. Weinand und T. Bruckner (2022). *Competent, trustworthy, and likeable? Exploring which peers influence photovoltaic adoption in Germany*. DOI: 10.1016/j.erss.2022.102755.
- Schelly, C. und J. C. Letzelter (2020). »Examining the Key Drivers of Residential Solar Adoption in Upstate New York«. In: *Sustainability* 12.6, S. 2552. DOI: 10.3390/su12062552.
- Schulte, E., F. Scheller, W. Pasut und T. Bruckner (2022). »Product traits, decision-makers, and household low-carbon technology adoptions: moving beyond single empirical studies«. In: *Energy Research & Social Science* 83, S. 102313.
- Schulte, E., F. Scheller, D. Sloot und T. Bruckner (2022). »A meta-analysis of residential PV adoption: the important role of perceived benefits, intentions and antecedents in solar energy acceptance«. In: *Energy Research & Social Science* 84, S. 102339.
- Trotta, G. (2018). »Factors affecting energy-saving behaviours and energy efficiency investments in British households«. In: *Energy Policy* 114, S. 529–539. ISSN: 03014215. DOI: 10.1016/j.enpol.2017.12.042.

PVactVal: Ein Ansatz für die operationale Validierung von Aufdach-PV Diffusionsmodellen

Simon Johannng¹, Emily Schulte¹, Daniel Abitz^{2,3}, Fabian Scheller⁴, Thomas Bruckner¹

Highlights

- Die Validierung des Modells PVact stellt sicher, dass die Simulation dem modellierten Gegenstand so weit wie möglich entspricht.
- Für die operationale Validierung des Simulationsmodell wurde die fehlerminimierende Parameterwahl evaluiert und ein alternativer Ansatz entwickelt.
- Das Modell weist einen Grad an Stochastizität auf, der bei der Modellkalibrierung zu Inkonsistenzen führt.
- Ein Ansatz über paarweisen Szenariovergleich wurde als Alternative hierzu entwickelt.

Validierung empirisch fundierter Modelle

Unter Modellvalidierung versteht man grob gesagt die Demonstration, dass ein Modell dem modellierten Gegenstand entspricht oder zumindest für die Abbildung des Modellierungskontextes geeignet ist. Sie stellt damit den wichtigsten Teil der Modellerstellung dar.⁵ Zur Validierung betrachtet

¹Institut für Infrastruktur und Ressourcenmanagement, Universität Leipzig

²Institut für Informatik, Universität Leipzig

³Universitätsrechenzentrum, Universität Leipzig

⁴Department of Technology, Management and Economics, Technical University of Denmark

⁵Vgl. Heath u. a., 2009.

man verschiedene Ansätze: Die *theoretische Verifikation* demonstriert eine adäquate Konzeptualisierung des Modellgegenstandes, während die *operationale Validierung* überprüft, inwiefern die Simulationsergebnisse mit den gemessenen Daten übereinstimmen.⁶ Die *Kreuzmodellvalidierung* misst, inwiefern sich die Resultate zweier Modelle entsprechen. Die *interne Validierung* prüft die Korrektheit der Softwareimplementierung, während die *Sicherheitsvalidierung* sicherstellt, dass in der Modellrekonfigurierung dieses nur minimal manipuliert wird. Die *Datenvalidierung* stellt sicher, dass Daten akkurat und adäquat gewählt und aufgearbeitet sind.⁷ In den modellseitigen Teil der Validierung fallen hierbei die theoretische Verifikation, operationale Validierung und Datenvalidierung. Die theoretische Verifikation und die Datenvalidierung des auf dem Innovationsdiffusionsframework IRPact⁸ beruhenden Modells PVact wurde bereits mit der theoretischen und empirischen Fundierung des Modells vorgenommen und im Ansatz dargestellt; daher konzentriert sich dieses Kapitel im Folgenden auf die **operationale Validierung** des Modells.

Carley unterscheidet zwischen 'intellektiven' (eng. *intellective*) Modellen als einfache Modelle, die für die theoretische Überprüfung von Annahmen oder spezifischer Prinzipien geeignet sind, und emulativen Modellen, die auf die Umsetzbarkeit spezifischer Veränderungen an einem tatsächlichen System abzielen. Für emulative Modelle ist eine grundlegendere Validierung notwendig und Modellkalibrierung gerade dann wichtig, wenn das Modell darauf abzielt, explizite Empfehlungen bezüglich eines spezifischen Problems oder einer Organisation zu geben. Dieses unterstreicht die Bedeutung der Modellkalibrierung im Kontext des SUSIC Projektes.⁹ Unter Modellkalibrierung versteht man hierbei die Einstellung des Modells in einer Weise, die sicherstellt, dass die Simulationsergebnisse des Modells den realen Daten entsprechen. Dieses umfasst den Abgleich von Modellparametern und -prozessen.

Während ein sehr großer Teil der Parameter des PVact-Modells bereits durch die empirische und theoretische Fundierung festgelegt werden konnte, war dies nicht für alle Modellparameter möglich. Für die Bestimmung

⁶Vgl. Takadama u. a., 2008.

⁷Vgl. Carley, 1996.

⁸Vgl. Johanning, Scheller u. a., 2020.

⁹Vgl. Carley, 1996.

dieser freien Parameter wurde der Ansatz der Modellkalibrierung gewählt, welcher in diesem Beitrag eruiert und diskutiert wird.

Ansatz zur Modellkalibrierung

Der erste Agentenzustand im Prozessmodell von PVact bildet ab, wie sich das Interesse an PV-Systemen in der Agentenpopulation verbreitet. Erst bei hinreichendem Interesse kann eine individuelle Adoptionsentscheidung getroffen werden.

Das Interesse verbreitet sich im Modell durch die Kommunikation mit Agenten im eigenen sozialen Netzwerk. Nach erfolgter Kommunikation erlangen Agenten je nach Adoptionszustand der Kommunikationspartner eine bestimmte Anzahl sogenannter Interessensepunkte; das Modell unterscheidet dabei zwischen Adoptern, Interessierten¹⁰ und Bewussten¹¹. Erreichen die kumulierten Interessensepunkte einen im Modell gesetzten *Interessenschwellenwert* (IT), gehen sie in den nächsten Zustand (Prüfung der Machbarkeit) über. Mit der Interessepropagierung verfügt das Modell somit über einen Mechanismus zur Verbreitung (Diffusion) von einer entscheidenden Adoptionsvoraussetzung. Dieser Mechanismus hängt wiederum deutlich von den erworbenen Interessensepunkten nach Adoptionsstatus der Kommunikationspartner sowie dem Interessenschwellenwert ab. In dem auf den *Machbarkeitszustand* folgenden *Evaluationszustand* bestimmen die entsprechenden Agenten den für sie individuellen Wert einer Anlage entsprechend einer Nutzwertanalyse. Diesen Wert vergleichen sie mit einem weiteren Parameter, dem *Adoptionsschwellenwert* (AT). Erreicht oder übersteigt der Nutzwert diesen Wert, adoptieren Agenten (sofern sie finanziell dazu in der Lage sind¹²) die Technologie.

Da die diskutierten Variablen modellintrinsisch sind und keine Entsprechung in der empirischen Fundierung des Modells haben, werden diese als *freie Parameter* angesehen, die von den Modellierenden gesetzt werden müssen, um das Modell zu kalibrieren. Diese stellen entsprechend unterschiedliche *Modellparametrisierungen* dar. Die Interessensepunkte, die der

¹⁰Solchen Agenten, die bereits den Interessenschwellenwert erreicht haben.

¹¹Alle Agenten verfügen über Bewusstsein über PV-Systeme.

¹²Siehe hierzu den Beitrag zum Entscheidungsverhalten der Agenten in diesem Band.

kommunizierende Agent in Abhängigkeit des Adoptionszustandes des Kommunikationspartners erhält, werden als *sekundäre Parameter* bezeichnet; von diesen hängt die Geschwindigkeit der Interesseakkumulation der Agenten ab (also wie schnell der Interessenschwellenwert erreicht wird). Ein Überblick der freien Parameter wird in Tabelle 11.1 gegeben.

Tabelle 11.1.: Freie Parameter im PVact Modell

Parameter	Wertebereich	Bedeutung
<i>Primäre freie Parameter</i>		
Adoptionsschwellenwert	$[0, 1]$	Minimaler Nutzenwert für Adoption
Interessenschwellenwert	N_0	Minimales Interesse für Übergang in Machbarkeitsphase
<i>Sekundäre freie Parameter</i>		
Adoptereinfluss	N_0	erhaltene Interessenpunkte durch Kommunikation mit Adoptern
Interessierteneinfluss	N_0	erhaltene Interessenpunkte durch Kommunikation mit interessierten Agenten
Bewussteneinfluss	N_0	erhaltene Interessenpunkte durch Kommunikation mit bewussten Agenten

Vorstudie zur Modellparametrisierung

Eine Betrachtung der sekundären Parameter im Rahmen einer Vorstudie mit reduzierter Agentenanzahl für die Fallstudie 'Leipzig' zeigte, dass der Effekt von Interessenpunkten über nicht-interessierte Agenten zu einer sehr schnellen und sprunghaften Verbreitung von Interesse, und mittelbar auch der Adoption führt, welches wiederum zu einem sehr steilen und mit der

beobachteten Diffusion inkonsistenten Adoptionsverlauf führt. Für den Zusammenhang des Adoptereinflusses AP , Interessierteneinflusses IP und dem Interessenschwellenwert IT ist festzustellen, dass (annähernd) eine Proportionalitätsrelation besteht¹³, welches die betrachtete Parameterzahl einschränkt und den betrachteten Raum auf einen zwei-dimensionalen Raum reduziert. Zwischen den in der Vorstudie betrachteten Parameterkonstellationen der sekundären Parameter¹⁴ wurde (mit Ausnahme des Bewussteneinfluss) kein drastischer Unterschied gesehen. Die Vorstudie hat gezeigt, dass eine Setzung der sekundären Parameter $(IP, AP) = (1, 5)$ zu guten Ergebnissen führt.

Anhand der durchschnittlichen Abweichung der installierten Anlagen zwischen den Simulationsergebnissen und der tatsächlichen Adoption wurden systematisch Kombinationen der primären freien Parameter innerhalb eines festgelegten Bereiches bewertet. Die untersuchten Parameter beinhalteten die Eckpunkte dieses Bereiches sowie dazwischenliegende Punkte in einem gleichmäßigen Abstand. Von diesen Punkten werden nun die Parameter ausgewählt, die den geringsten Fehler Δ erzeugt haben und als Mittelpunkt einer neuen Verfeinerung des betrachteten Bereiches gesetzt, um sicherzustellen, dass diese Punkte innerhalb des verfeinerten Suchbereiches liegen. Durch den in Kasten 1 beschriebenen Ansatz wird somit der Parameterraum systematisch durchsucht.

Für die Vorstudie der Kalibrierung auf Basis der Fallstudie 'Leipzig' wurden drei Fehlermetriken betrachtet: der durchschnittliche Fehler (mean average error MAE), der die jährliche Abweichung installierter PV-Systeme zwischen den Simulationsergebnissen x_i und den Referenzdaten \hat{x}_i über N Jahre beschreibt (siehe Gleichung 11.1), der quadratische Fehler $RMSE$ (root mean square error als Wurzel der Summe der quadratischen Fehler, siehe Gleichung 11.2) und die kumulative Adoptionsabweichung CAE (cumulative adoption error als den durchschnittlichen Fehler der installierten Systeme zwischen der Simulation und den beobachteten Daten, siehe Gleichung 11.3).

Um eine größere Anzahl von Fällen unter diesen drei Fehlermetriken zu

¹³Also dass bspw. ein Interessenschwellenwert von 40, Adoptereinfluss 1 und Interesseneinfluss von 2 zu dem gleichen Modellverhalten führt wie ein Interessenschwellenwert von 80, Adoptereinfluss 2 und Interesseneinfluss von 4.

¹⁴ $(IP, AP) \in \{(1,2), (1,3), (1,5), (2,5)\}$.

Algorithm 1 ALGO Grid Depth Search

aktuelles $\Delta \leq$ akzeptables Δ ODER Rekursionstiefe $RT \geq$ max. $RT \rightarrow$ ENDE
 Berechne Gitter $([\underline{IT}, \overline{IT}]) \times ([\underline{AT}, \overline{AT}])$ mit äquidistanten Punktabständen.
 Berechne das Modell für jeden Gitterpunkt und sammle die Ergebnisse in einer Matrix

$$\begin{pmatrix} ((\underline{IT}, \underline{AT}) & \dots & ((\underline{IT}, \overline{AT}) \\ \dots & \dots & \dots \\ ((\overline{IT}, \underline{AT}) & \dots & ((\overline{IT}, \overline{AT}) \end{pmatrix}$$

Für jedes Minimum: berechne Grenzen eines feineren Gitters mit neuem Durchmesser $[\underline{IT}, \overline{IT}] * \text{scaleFactor}^{-1}$ und $[\underline{AT}, \overline{AT}] * \text{scaleFactor}^{-1}$ mit der Ausnahme von Punkten außerhalb von $[0, 128] \times [0.0, 1.0]$ ¹⁵.

betrachten, wurde die Simulation mit einer reduzierten Anzahl von 1.341 Agenten¹⁶ durchgeführt, wobei die sozio-ökonomischen und geografischen Verteilung proportional beibehalten wurden.

$$MAE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |x_i - \tilde{x}_i| \quad (11.1)$$

$$RMSE = \frac{1}{N} \sqrt{\sum_{i=1}^N (x_i - \tilde{x}_i)^2} \quad (11.2)$$

$$CAE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left| \sum_{j=1}^i x_j - \sum_{j=1}^i \tilde{x}_j \right| \quad (11.3)$$

¹⁵Dieser Bereich wurde gewählt, da der Adoptionsschwellenwert nach Definition im Einheitsintervall liegt, und der Interesseschwellenwert eine nicht-negative Zahl darstellt. Der obere Schwellenwert des Interesseschwellenwertes von 128 wurde im Rahmen der Vorstudie entsprechend festgelegt.

¹⁶Die fallstudienabhängige Anzahl reduzierter Agenten wurde so gewählt, dass zu Beginn der Simulation (2008) zwei Agenten bereits über eine PV-Anlage verfügen.

Ergebnisse der Vorstudie zur Wahl der Metrik und Parametereingrenzung

Das Ergebnis der Simulation für die Vorstudie am Fall Leipzig zeigt, dass kleine Parameterwerte *IT* und *AT* über alle Metriken hinweg zu großen Fehlern führen (siehe Abbildung 11.1).

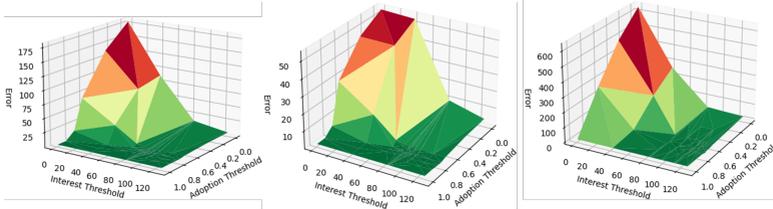


Abbildung 11.1.: Differenz der Simulationsergebnisse und tatsächlicher Adoption entsprechend der Fehlermetriken MAE, RMSE und CAE laut Formeln 11.1, 11.2 und 11.3. Eigene Darstellung und Berechnung.

Für andere Parameterbereiche zeichnet sich ein weniger deutliches Bild ab. Eine engere Betrachtung der Parameterlandschaft mit kleineren Fehlern zeigt eine starke Abweichung der Fehler zwischen ähnlichen Parameterkombinationen, die zwischen den betrachteten Fehlermetriken nicht konsistent sind, wie in Abbildung 11.2 gezeigt ist.

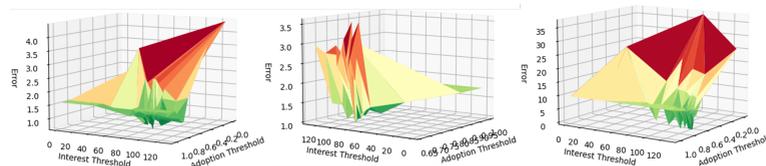


Abbildung 11.2.: Betrachtung der Parameterkombinationen mit beschränktem Fehler zwischen den Referenzdaten und den Simulationsergebnissen. Fehlerbezogene Inklusionsschranke gesetzt bei 4,5 (MAE), 3,6 (RMSE) bzw. 37,2 (CAE). Eigene Darstellung und Berechnung.

Eine genauere Analyse zeigt auf, dass diese deutlichen Unterschiede im Simulationsergebnis nicht allein auf die unterschiedliche Parametrisierung

zurückzuführen sind. Wie vergleichende Analysen mit fixierten Parametrisierungen zeigen, haben stochastische Elemente des Entscheidungsalgorithmus (z.B. die stochastische Agenteninitialisierung, Kommunikationsverhalten oder die Einstellungsdynamik) teilweise einen Einfluss auf die Abweichung zu den beobachteten Werten (vgl. Abbildung 11.3), der den Einfluss einer unterschiedlichen Parameterwahl (in dem in Abbildung 11.2 betrachteten Rahmen) deutlich übersteigt. Dies betont die Notwendigkeit, den Einfluss stochastischer Modellkomponenten auf den Simulationsverlauf im Rahmen der Modellkalibrierung und Modellanwendung explizit zu berücksichtigen.

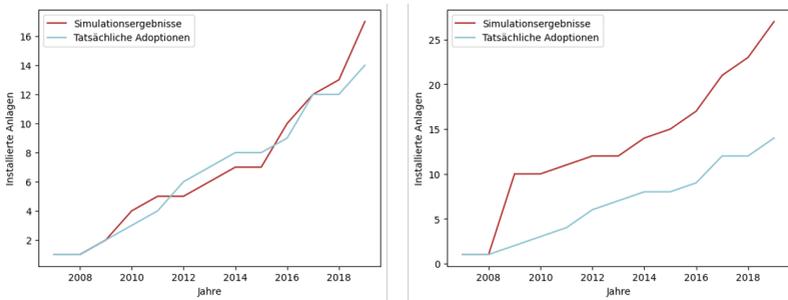


Abbildung 11.3.: Beispiel für den Einfluss stochastischer Modellkomponenten auf die Simulationsergebnisse anhand des kumulierten Adoptionsverlaufs gleicher Parametrisierung bezüglich des Referenzverlaufs. Parametrisierung der Läufe mit IT von 128 und AT von 0,25 für eine reduzierte Agentenzahl in der Fallstudie Leipzig. Eigene Darstellung und Berechnung.

Fallstudie Dresden: Kalibrierung des Modells PVact

Die Kalibrierung des Adoptionsschwellenwerts für das Modell wurde anhand der Fallstudie Dresden mit voller Agentenpopulation vorgenommen. Die Abweichungen der Referenzdaten wurden hierbei mit dem kumulierten Fehler (CAE) vorgenommen. Die Ergebnisse sind in Abbildung 11.4 dargestellt.

Auch bei dieser Studie zeigt sich ein klares Bild für geringere Interessenschwellenwerten, unter denen im Modell sehr früh in der Simulation sehr

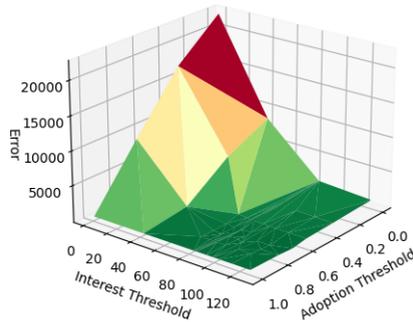


Abbildung 11.4.: Betrachtung der vollen Fallstudie Dresden unter der Fehlermetrik CAE. Eigene Darstellung und Berechnung.

stark adoptiert wird. Bei der näheren Betrachtung zeigt sich ähnliches Verhalten wie in der Vorstudie (siehe Abbildung 11.5); allerdings ist hier der Parameterbereich, in dem das beobachtete Verhalten gut angenähert wird, konzentrierter als dieses in der Vorstudie der Fall war. Dies gilt insbesondere für den Adoptionsschwellenwert, der für den Wert 0,704 qualitativ die besten Ergebnisse hervorbringt (für die Interessenschwellenwerte 84, 94, 104 und 114).

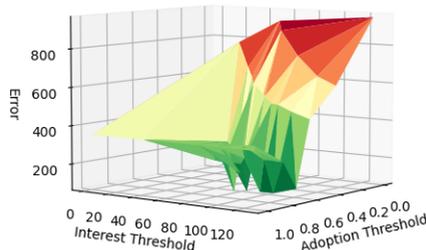


Abbildung 11.5.: Betrachtung einer reduzierten Menge der Ergebnisse für die volle Fallstudie Dresden unter der Fehlermetrik CAE. Eigene Darstellung und Berechnung.

Der Einfluss der Stochastizität zeigt sich bei dieser Studie ebenso wie in der Vorstudie, allerdings fällt dieser weniger drastisch aus. Zwischen Läufen gleicher Parametrisierung sind Abweichungen von bis zu 67% zu

beobachten (siehe hierfür Abbildung 11.6), während sich selbst Läufe mit unterschiedlicher Parametrisierung teilweise nur um gut 1% unterscheiden.

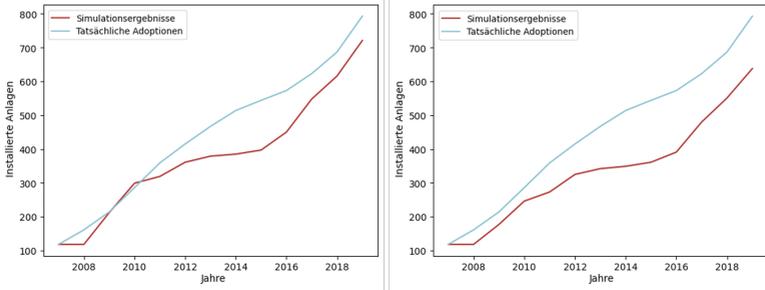


Abbildung 11.6.: Beispiel für den Einfluss stochastischer Modellkomponenten auf die Simulationsergebnisse anhand des kumulierten Adoptionsverlaufs gleicher Parametrisierung bezüglich des Referenzverlaufs. Parametrisierung der Läufe mit IT von 104 und einem AT von 0,704 für die volle Agentenzahl in der Fallstudie Dresden. Abweichungen zu der Referenzzeitreihe betragen 69,25 bzw. 115,42. Eigene Darstellung und Berechnung.

Die Fallstudie Dresden mit der vollen Agentenzahl weist somit zwar weiterhin eine deutliche Abweichung auf; diese ist aber in ihrer Größenordnung nicht mit der oben betrachteten reduzierten Fallstudie Leipzig vergleichbar. Ein gewisser Grad an Stochastizität scheint somit durch die Modellgröße kompensiert zu werden. Dieses könnte auch an der Diskretizität des Systems liegen, da die Adoption einer einzelnen PV-Anlage einen deutlich stärkeren Einfluss hat, wenn die Gesamtanlagen im niedrigen zweistelligen Bereich liegen, als wenn sie sich im hohen dreistelligen Bereich befinden.

Diskussion der Kalibrierungsstudie und des Validierungsansatzes

Diese Ergebnisse zeigen, dass der Ansatz zur Exploration der Parameterlandschaft zwar grundlegend funktioniert sowie Ergebnisse differenziert und nah an der tatsächlichen Adoption darstellen kann (wie im jeweilig linken Verlauf der Abbildungen 11.3 und 11.6 zu sehen ist); jedoch zeigt

sich ebenfalls, dass sich dieser für eine exakte Bestimmung eines Parameteroptimums nur wenig eignet. Der Ansatz der operationalen Validierung von PVact mit einer fehlerminimierenden Parameterkombination der freien Parameter zeigt somit eine fundamentale Herausforderung der Parameteroptimierung von Modellen stochastischer Systeme. Wenn der Unterschied verschiedener Simulationsläufe mit gleicher Parametrisierung größer ist als die Ergebnisse verschiedener Parametrisierung, ist die Unterscheidungskraft verschiedener Parametrisierungen vernachlässigbar und ein neuer Ansatz für die Fundierung der Modellergebnisse notwendig.

Als Lösung für diese Lage war somit ein Ansatz zu finden, der es ermöglicht, die im Anwendungskontext auftretende stochastische Varianz abzubilden, miteinander zu vergleichende Läufe nicht durch stochastische Einflüsse zu überlagern und Szenarien, die verschiedene Handlungsoptionen darstellen, miteinander zu vergleichen können. Der Modellvalidierungsansatz PVactVal basiert auf dieser Beobachtung und wird im Folgenden dargestellt.

PVactVal

PVactVal ist ein Simulationsmodellvalidierungsansatz, der die Stochastizität von Systemdynamiken agentenbasierter Innovationsdiffusionsmodelle als gegeben akzeptiert. Er ist als eine Antwort auf die oben dargestellte Problematik zu verstehen. Anstelle der Optimierung einzelner Parameterkombinationen, die den gemessenen Fehler als beste Annäherung an die Realität minimieren, nimmt dieser die Stochastizität realer komplexer Systeme ernst. Der Ansatz evaluiert dabei nicht Handlungsoptionen einzelner Modellinstanzen, sondern gruppiert vergleichbare Simulationsläufe über verschiedene Parameterkombinationen, stochastische Ereignisse und Szenarios hinweg.

Die Auswertungsphase des Modellierungsprozesses verläuft hierbei wie folgt:

1. Definition der Metrik M , Parameterbereich $[\underline{AT}, \overline{AT}] \times [\underline{IT}, \overline{IT}]$ ¹⁷, Granularität $g \in \mathbb{N}^+$, Interventionsmaßnahmen $K \ni k_0$ (mit k_0 als den

¹⁷Dabei ist \underline{AT} die untere Schranke des Adoptionsschwellenwerts, \overline{AT} die obere Schranke des Adoptionsschwellenwerts, \underline{IT} die untere Schranke des Interessenschwellenwerts und \overline{IT} die obere Schranke des Interessenschwellenwerts.

- Referenzfall (business-as-usual)), und der Anzahl der Wiederholungen n ,
2. Erzeugung von $g^2 * n$ paarweise unterschiedlicher Seeds S_L für den Zufallszahlgenerator, der in der Simulation verwendet wird¹⁸,
 3. Indizierung der Parameterkombination (AT_i, IT_i) mit den Indizes $i \in [0, g^2 - 1]$, sodass $(AT_i, IT_i) = (\underline{AT} + ((i \bmod g) * \frac{\overline{AT} - \underline{AT}}{g}), (IT + (\lfloor \frac{i}{g} \rfloor * \frac{\overline{IT} - \underline{IT}}{g})))$ gilt, um ein gleichmäßiges (äquidistantes) Netz auszuwertender Punkte im Parameterquader zu erzeugen¹⁹,
 4. Für alle Maßnahmen $k \in K, i \in [0, g^2 - 1], j \in [0, n - 1]$ werte das Modell an den Parameterwerten AT_i, IT_i mit Seed $s_l \in S_L, l = i * n + j$ aus, um das Modellverhalten P_{ijk} zu erhalten,
 5. Für alle paarweisen $k, \hat{k} \in K$, analysiere $M(P_{ijk}, P_{ij\hat{k}})$,
 6. Für jede Wiederholung j aggregiere $M(P_{ijk}, P_{ij\hat{k}})$ über alle $i \in [0, n - 1]$ und erzeuge die Parameterfehlermatrix über alle Parameter AT_i, IT_i .

Für Schritt 1) ist es an den Modellierenden sicherzustellen, dass das Parameterintervall im plausiblen Bereich liegt, in dem das Modell Ergebnisse liefert, die 'nahe genug' an den Referenzdaten liegen, um angemessene Modellinstanzen zu analysieren.

Ausblick & zukünftige Arbeiten

Der vorgestellte Ansatz ist Teil aktiver laufender Forschung am Simulationsmodell PVact und ist als solcher Teil weiterer Modelluntersuchungen. Zukünftige Forschung konzentriert sich auf die Integration des Validierungsframeworks in die tiefere Analyse des Modells. Eine vielversprechende Forschungsrichtung wird hierbei in den Auswirkungen einzelner Modelldynamiken auf der Komponentenebene gesehen. Durch Veränderungen bzw. Deaktivierung einzelner Modellelemente kann ihr Effekt,

¹⁸Zwei Simulationsläufe mit dem gleichen Seed erzeugen das exakt gleiche Simulationsverhalten wenn Parallelität der Simulation unterbunden wird (bei exakt gleicher Parametrisierung), sodass Simulationsläufe unterschiedlicher Szenarien mit gleichem Seed direkt vergleichbar sind.

¹⁹Diese Transformation von einem eindimensionalen Index in ein zweidimensionales Netz zerlegt den Bruch $\frac{i}{g}$ in seinen ganzzahligen Teil $\lfloor \frac{i}{g} \rfloor$ (wobei die Abrundungsfunktion $\lfloor x \rfloor : \mathbb{Q} \rightarrow \mathbb{Z}$ eine rationale Zahl auf die nächstkleinere ganze Zahl projiziert) und ihren Rest (i.e., $\frac{i}{g} = \lfloor \frac{i}{g} \rfloor + i \bmod g, \forall i, g \in \mathbb{Z}$).

sowie die Auswirkung auf andere Modellkomponenten untersucht werden. Dieses verbessert nicht nur das Verständnis der einzelnen Komponenten, sondern auch des Modellverhaltens selber.

Weiterhin hat sich die Modellentwicklung eher auf die Validierung des Modells als dessen Anwendung und die Auswertung politischer Instrumente und Maßnahmen konzentriert. Diese Instrumente einzubauen und deren Unterschiede im Modellverhalten zu untersuchen führt zu tieferen Verständnis der Auswirkungen der Instrumente sowie des Modells. Der oben beschriebene Ansatz ist explizit darauf ausgerichtet, verschiedene Maßnahmen zu vergleichen und sollte durch die Anwendung dieser Maßnahmen evaluiert werden.

Eher theoretischer Natur sollte sich zukünftige Forschung verschiedener Ansätze zur Aggregation der Qualität der Ergebnisse widmen. Es ist zu erwarten, dass sich die Struktur der Unterschiede der Ergebnisse darin unterscheidet, ob Maßnahmen zwischen einzelnen Modellläufen verglichen werden oder Läufe der gleichen Parameterkombination vor dem 5. Schritt aggregiert werden. Dieses würde vermutlich ebenso gelten, wenn der Vergleich zwischen den Maßnahmen nach der Erstellung der Parameterfehlermatrix aggregiert wird. Dieses hängt weiterhin stark davon ab *wie* die Maßnahmen verglichen werden. Verschiedene Läufe mit unterschiedlichen Parametern führen zu einer Verteilung der Modellergebnisse auf dessen Basis die Maßnahmen verglichen werden. Konkret betrifft dieses die Frage, ob die verwendeten Fehlermetriken M auf skalaren Werten oder einer Matrix von Werten beruhen, bzw. wie die Abstände innerhalb dieser Metrik gemessen und bewertet werden.

Ein weiterer Einflussfaktor auf die Qualität der Modellergebnisse wird in der Skalierung gesehen. Die Abbildungen zeigen, dass sich stochastische Modellabweichungen ein Stück weit normalisieren, wenn der Modellierungskontext größer gezogen wird. In einer tieferen Untersuchung der Skalierung wird eine weitere wertvolle Forschungsrichtung gesehen.

Schließlich wäre eine stärkere Anbindung an die Literatur zum Umgang mit Unsicherheit (uncertainty) in der Modellierung und Simulation sowie stochastischer Phänomene hilfreich, um die Diskussion theoretisch stärker zu verankern.

Anmerkung

Inhalte dieses Kapitels wurden auf der 'European Energy Market Conference' 2022 in englischer Sprache eingereicht.²⁰

Danksagung

Dieser Beitrag wurde finanziert durch das Projekt „Smart Utilities and Sustainable Infrastructure Change“ (Antragsnummer 100378087 (SAB)).

Diese Maßnahme wird mitfinanziert durch Steuermittel auf der Grundlage des vom Sächsischen Landtag beschlossenen Haushaltes.



DOI: <https://doi.org/10.30819/5413.11>

Literatur

- Carley, K. M. (1996). »Validating Computational Models«. In: *CASOS Working Paper* 0793.
- Heath, B., R. Hill und F. Ciarallo (2009). »A Survey of Agent-Based Modeling Practices (January 1998 to July 2008)«. In: *Journal of Artificial Societies and Social Simulation* 12.4 9.
- Johanning, S., D. Abitz, E. Schulte, F. Scheller und T. Bruckner (Sep. 2022). *PVactVal: A Validation Approach for Agent-based Modeling of Residential Photovoltaic Adoption*. 18th International Conference on the European Energy Market (EEM).
- Johanning, S., F. Scheller, D. Abitz, C. Wehner und T. Bruckner (2020). »A modular multi-agent framework for innovation diffusion in changing business environments: conceptualization, formalization and implementation«. In: *Complex Adaptive Systems Modeling* 8.1. DOI: 10.1186/s40294-020-00074-6.
- Takadama, K., T. Kawai und Y. Koyama (2008). »Micro- and Macro-Level Validation in Agent-Based Simulation: Reproduction of Human-Like Behaviors and Thinking in a Sequential Bargaining Game«. In: *Journal of Artificial Societies and Social Simulation* 11.2 9.

²⁰Vgl. Johanning, Abitz u. a., 2022.

Empirische Untersuchung zum Entscheidungsverhalten von Wohnungsunternehmen und Konzeptmodell

Stefan Geyler¹, Marie Moritz¹, Lisa Metzinger¹

Highlights

- Ziel war die Konkretisierung des Konzepts zur Nutzungsentscheidung von Wohnungsunternehmen (WU) gegenüber grundstücksbezogenen Regenwasserbewirtschaftungsanlagen (gRWA) mithilfe einer Online-Befragung und die Formulierung eines agentenbasierten Konzeptmodells.
- Die Befragungsergebnisse verweisen u. a. auf Neubau durch WU als wichtigste Gelegenheit zur Errichtung von gRWA, weiterhin auf die Relevanz von rechtlicher Erfordernis, einer förderlichen sonstigen Governance und Erfahrungen der Unternehmen mit gRWA.
- Dreizehn interne und externe Einflussfaktoren wurden in das Konzeptmodell integriert.

Einleitung

Um Wohnungsunternehmen (WU) in ihrem Entscheidungsverhalten bzgl. grundstücksbezogener Regenwasserbewirtschaftung (gRWA) zu verstehen, wurde im Beitrag zur Entscheidungsfindung bezüglich gRWA ein

¹Institut für Infrastruktur und Ressourcenmanagement, Universität Leipzig

Untersuchungskonzept theoretisch begründet. Dieses strukturiert den Entscheidungsprozess und verbindet für dessen Teilschritte Annahmen zum Entscheidungsverhalten mit externen Einflüssen. Es zielt darauf ab, die intra- und interkommunal variierenden Einflüsse in ihrer Wirkung auf das Nutzungsverhalten von WU zu erklären. Im folgenden Beitrag wird dieses Konzept inklusive der zugrunde gelegten Einflussfaktoren, Beziehungen und Dynamiken empirisch überprüft. Hierzu werden Ergebnisse einer deutschlandweit durchgeführten Online-Befragung herangezogen. Daran anschließend werden Entscheidungsschritte der WU als Agenten urbaner Systeme in einem Konzeptmodell formalisiert.² Agentenbasierte Modelle können sich komplexen Phänomenen durch einen bottom-up-basierten und disaggregierten Erklärungsansatz nähern und hierbei Heterogenität sowie ein breites Spektrum an sozialen Interaktionen aufgreifen.³ Die Analyse der Diffusion von gRWA kann somit als ein Baustein der Analyse komplexer soziotechnischer Systeme⁴ verstanden werden, zu denen auch urbanes Regenwassermanagement zählt. Agentenbasierte Modelle vermögen daher politische Entscheidungen aus einer vielschichtigeren Analyse heraus zu unterstützen, als einfache Bewertungsansätze.⁵ Trotz dieses Potentials sind gerade Anwendungsfälle in Bezug auf die Dezentralisierung des Regenwassermanagements kaum vorhanden.⁶ Im Folgenden werden zunächst Befragungsdesign und -ergebnisse vorgestellt, im zweiten Teil wird das Konzeptmodell umrissen.

Quantitative Befragung von Wohnungsunternehmen

Befragungsdesign

Die Online-Befragung orientierte sich am Untersuchungskonzept, welches im Kapitel zur Entscheidungsfindung bezüglich gRWA vorgestellt wurde. Die Erhebung erfragte von Wohnungsunternehmen Informationen zum

²Vgl. Johanning u. a., 2020; Nikolic u. a., 2013.

³Vgl. Dijkema u. a., 2013; Kiesling u. a., 2012; Rounsevell u. a., 2012.

⁴Vgl. Dijkema u. a., 2013.

⁵ebd.

⁶Für Anwendungsbeispiele – siehe Castonguay u. a., 2018; Lu u. a., 2013; Montalto u. a., 2013.

grundsätzlichen Nutzungsverhalten (Phase 1 – "Wann?"), zur Technologiewahl (Phase 2 – "Welche Anlage?") sowie zu Schlussfolgerungen aus den Erfahrungen mit gRWA (Phase 3 – "Welche Lerneffekte?"). Dafür wurden mehrere Befragungspfade entwickelt, sodass sowohl Nichtnutzer der Anlagen als auch Nutzer einbezogen werden konnten sowie diejenigen, die gRWA gerade planten. Für die Stichprobe wurden 48 Großstädte in zehn deutschen Bundesländern ausgewählt und die dort ansässigen WU per E-Mail angeschrieben. Für eine gleichmäßigere Verteilung der Eigentumsformen wurden zusätzlich rund 160 kommunale WU in kleineren Städten kontaktiert. Innerhalb des einmonatigen Befragungszeitraums im Frühjahr 2021 wurden zwei Erinnerungsschreiben versendet. Von den insgesamt 1.000 angeschriebenen Unternehmen antworteten 98, davon 58 % Wohnungsgenossenschaften, 30 % kommunale WU und 12 % privatwirtschaftliche WU. Der Rücklauf von privatwirtschaftlichen WU fiel mit 3 % der angefragten Unternehmen sehr niedrig aus im Vergleich zu den Genossenschaften mit 15 %, sodass über sie kaum Aussagen getroffen werden konnten. Multiple Imputation⁷ wurde, wo notwendig und möglich, zur Verringerung der Schweigeverzerrung durch Antwortausfälle genutzt.

Ergebnisse zur grundsätzlichen Nutzungsentscheidung

Unabhängig von der konkreten Wahl der Technologie gaben 54 Unternehmen (65 %) an, in den vergangenen fünf Jahren mindestens eine gRWA errichtet oder zumindest geplant zu haben; 31 Unternehmen (35 %) hatten weder eine Anlage errichtet noch geplant. 55 % der befragten WU äußerten, ihre gRWA freiwillig errichtet zu haben, 44 % taten dies aufgrund rechtlicher Vorgaben (Daten nicht imputiert). Der bauliche Lebenszyklus der Gebäude spielt eine große Rolle bei der Errichtung von gRWA. Abbildung 12.1 beschreibt für diejenigen Unternehmen, die gRWA schon einmal errichtet oder geplant haben, die Häufigkeit, mit der hierfür bauliche Gelegenheiten genutzt wurden. Neubau dominiert deutlich gegenüber Sanierung, Modernisierung und einer Nutzung unabhängig von baulichen Gelegenheiten. Der Erwerb von Immobilien spielt bei WU als Gelegenheit keine Rolle.

⁷Statistisches Verfahren, um fehlende Daten in Erhebungen zu vervollständigen.

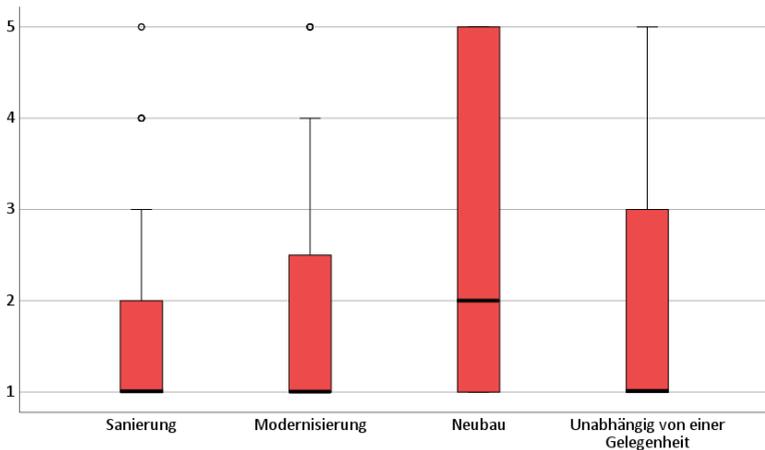


Abbildung 12.1.: Häufigkeit der genutzten Gelegenheit zur Errichtung einer gRWA, wobei 1 – nie/sehr selten, 3 – manchmal, 5 – sehr häufig; N = 83. Quelle: Befragung SUSIC gRWA.

Weiterhin wurden Einflussfaktoren auf die Nutzungshäufigkeit von gRWA im Rahmen von Sanierung/Modernisierung, Neubau sowie bei einer Nutzung unabhängig von baulichen Gelegenheiten beurteilt. Als erklärende Variablen wurden neben der Eigentumsform und Unternehmensgröße die finanziellen und informatorischen Governancebedingungen und separat die rechtliche Erfordernis zur Errichtung einer Anlage herangezogen sowie die bisherigen Erfahrungen mit gRWA betrachtet (Tabelle 12.1).⁸

Die Nutzungsraten – bei Neubau (N.) als auch unabhängig von baulichen Gelegenheiten (U.) – zeigen mindestens im bivariaten Vergleich einen positiven Zusammenhang mit der Beurteilung der rechtlichen Erfordernis (Tabelle 12.2). Zugleich wirkt sich die Erfahrung positiv aus. Die Bedeutung von rechtlichen Ge- und Verboten bei Neubau deutete sich auch in Fachgesprächen an. Ein positiver Einfluss der Governance zeigt sich bei allen baulichen Gelegenheiten (S./M.; N.) im Rahmen der bivariaten Korrelation. Die multivariate Regression bestätigt diese Faktoren im Wesentlichen, zeigt

⁸Für eine theoretische Betrachtung der Einflussfaktoren – siehe Kapitel zur Entscheidungsfindung bezüglich gRWA.

Empirik & Konzeptmodell zu Entscheidungen der RW-Bewirtschaftung

Tabelle 12.1.: In die Analyse der Nutzungshäufigkeit von gRWA einbezogene Einflussfaktoren und Variablen. Eigener Entwurf.

Einflussfaktor	Codierung der Variable
Abhängige Variable – Häufigkeit der Nutzung bei Gelegenheit	
Sanierung (S.); Modernisierung (M.); unabhängig von Gelegenheit (U.); Neubau (N.)	jeweilige Häufigkeit, transformiert (0,1; ... ; 0,9)
S./M.; S./M./U.; gesamt	Mittelwert über die einbezogenen Häufigkeiten, transformiert (0,1; ... ; 0,9)
Unabhängige Variablen	
Eigentumsform (Eig.)	privatwirt. WU = 1; komm. WU/Genossenschaft = 0
Unternehmensgröße (UG.)	Logarithmus der Mitarbeiterzahl
Rechtliche Erfordernis (R.)	Beurteilung der rechtlichen Erfordernis (1; ... ; 5)
Sonstige Governancebedingungen (sGov.)	Aggregierte Beurteilungen der Höhe der RW-Entgelte, des Impulses durch Beispielanlagen, der Verfügbarkeit von Fördermitteln sowie von Informationen) (1; ... ; 5)
Erfahrungen (E.)	Umsetzung von gRWA in vergangenen 5 Jahren = 1; keine Umsetzung/geplant = 0

jedoch zugleich, dass sich nur ein sehr geringer Anteil der Variabilität erklären lässt. Keine signifikante Bedeutung hatten die Unternehmensgröße und die Eigentumsform. Allerdings korrelieren Unternehmensgröße und Erfahrung signifikant, wenn auch mit geringer Effektstärke (Kendall-Tau-b, $\tau_b = 0,21$; $p < 0,1$). Größere Unternehmen haben in der Vergangenheit tendenziell häufiger schon einmal eine gRWA errichtet als kleinere. Die geringe Beteiligung privater WU hat möglicherweise die Analyse des Einflusses der Eigentumsform erschwert.

Tabelle 12.2.: Signifikante Einflussfaktoren auf Nutzungshäufigkeit von gRWA zu verschiedenen Gelegenheiten – bivariate Korrelation und multivariate lineare Regression; N = 85. Quelle: Befragung SUSIC gRWA.

Häufigkeit der Nutzung von gRWA bei Gelegenheit	Bivariate Korrelation		Multivariate Analyse	
	Kendall-Tau-b		Regr.-Koeff.	R ²
Neubau (N.)	R. 0,34 ^a	sGov. 0,17 ^c E. 0,28 ^b	R. 0,10 ^b E. 0,13 ^c	0,16 ^h
Sanierung (S.) o. Modernisierung (M.)	sGov. 0,14 ^c		sGov. 0,07 ^c	0,025
Sanierung (S.) o. Modernisierung (M.) o. Unabhängig von einer Gelegenheit (U.)	sGov. 0,15 ^c E. 0,17 ^c		R. 0,03 ^c	0,03
Unabhängig von einer Gelegenheit (U.)	R. 0,17 ^c E. 0,25 ^b		E. 0,11 ^c	0,034 ^h
Gesamt	R. 0,28 ^a E. 0,25 ^b		R. 0,04 ^b	0,07 ^h

Signifikanzniveaus: ^a p < 1 %, ^b p < 5 %, ^c p < 10 %, N = 85; ^h lineare Regression mit heteroskedastizität-konsistenten Standardfehlern; es sind nur die signifikanten Variablen aufgeführt.

Ergebnisse zur Technologiewahl und rückblickenden Bewertung

Danach befragt, welche Anlagentypen die Unternehmen schon geplant oder umgesetzt haben, wurden in knapp 60 % der Fälle Gründächer und in reichlich 10 % Versickerungslösungen als Einzelmaßnahme angegeben. In 30 % der Fälle wurden sogar Kombinationen von beiden gewählt.⁹ Zugleich besteht ein starker linearer Zusammenhang ($r = 0,57$, $p = 0,02$) zwischen der Technologiewahl und der baulichen Gelegenheiten. WU, die ihre gRWA beim Neubau eines Gebäudes errichteten, bauten vor allem Gründächer (Tabelle 12.3). Offenbar fließen bei der Technologiewahl nicht allein die Kosten für Bau und Betrieb der Anlagen ein, da dann Versickerungslösungen dominieren müssten.

Bei der Technologiewahl können verschiedene Bewertungskriterien für die WU relevant sein. WU mit Erfahrung in Bezug auf gRWA wurden daher gebeten, für ein selbstgewähltes Fallbeispiel die Wichtigkeit von fünf Bewertungskriterien bzgl. der Technologiewahl zu vergleichen (Abbildung

⁹Aussagen beziehen sich auf die Bitte an die befragten WU, jeweils ein Fallbeispiel zu beschreiben.

Tabelle 12.3.: Abhängigkeit der Technologieentscheidung von der Gelegenheit zum Bau einer gRWA – dargestellt als Anzahl der Nennungen; N = 24, nicht imputiert. Quelle: Befragung SUSIC gRWA.

Gelegenheit zur Installation der gRWA	nur Gründach	nur Versickerung	Gründach und Versickerungsanlage
Sanierung/Modernisierung	1	2	0
Neubau	12	1	5
keine bestimmte Gelegenheit	1	0	2

12.2). Die ökologische Wirkung wurde als überdurchschnittlich relevant und wichtiger als wirtschaftliche Effekte für Vermieter und Mieter:innen sowie Verkehrssicherheit und die ästhetischen Aspekte bewertet. Da diese Frage fast nur von kommunalen WU / Genossenschaften beantwortet wurde, könnte hier die Gemeinwohlorientierung dieser Unternehmen sichtbar werden. Es könnten sich aber auch rechtliche Erfordernisse oder Internalisierungseffekte durch Fördermaßnahmen widerspiegeln, da Einleitbegrenzungen oder Fördermaßnahmen mit ökologischen Zielen begründet werden.¹⁰ Abschließend wurden die Unternehmen, die Anlagen umgesetzt hatten, nach ihrer Zufriedenheit mit den gRWA gefragt. Knapp 60 % der Befragten äußerten Zufriedenheit, weniger als 5 % waren unzufrieden, die restlichen antworteten neutral. Es gab keinen Zusammenhang zwischen Zufriedenheit mit der gRWA und der Freiwilligkeit/Nichtfreiwilligkeit von deren Errichtung (Spearman's Rho, $r = 0,0$; $p = 0,96$). Daraus lässt sich ableiten, dass verpflichtende kommunale Vorgaben zur Nutzung von gRWA nicht zwangsläufig zu negativen Rückkopplungseffekten bei den WU führen. Von den WU, die bisher noch keine gRWA geplant oder errichtet hatten, meinten rund 60 %, dass sie dies in Zukunft wahrscheinlich noch tun werden, während die restlichen 40 % diese Möglichkeit eher ausschlossen. Entsprechend wäre eine weitere Verbreitung der gRWA auch bei bisherigen Nichtnutzern zu erwarten.

¹⁰Vgl. bspw. Senatsverwaltung für Umwelt, Verkehr und Klimaschutz Berlin, 2018.

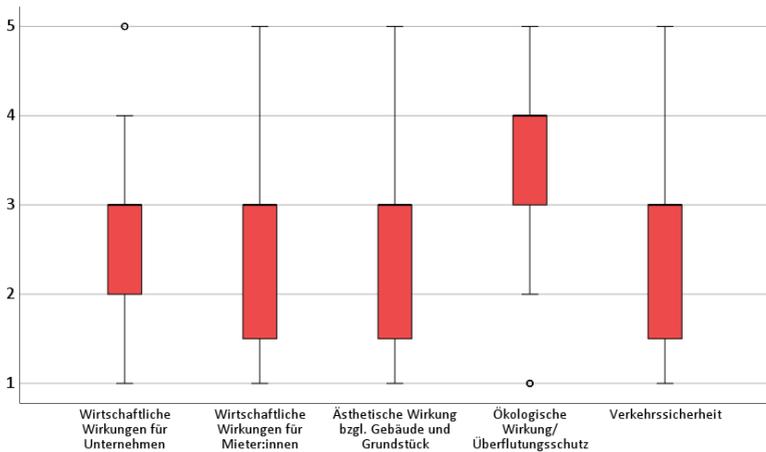


Abbildung 12.2.: Bedeutung der Bewertungskriterien für ein von den WU selbstgewähltes Fallbeispiel der gRWA-Nutzung (oder -Planung), wobei 1 – nicht in Bewertung eingeflossen, 3 – relevant, 5 – entscheidend; N = 38. Quelle: Befragung SUSIC gRWA.

Konzeptmodell – agentenbasierte Modellierung

Erklärungsziel des Konzeptmodells ist es, die Wechselwirkungen von externen Einflüssen auf die Entscheidung der WU strukturiert zu beschreiben. Dies ist der Ausgangspunkt, um in einem späteren Schritt Netzwerkeffekte zu ergänzen. Die Nutzungsentscheidung als Sequenz von Entscheidungsschritten wird als Ergebnis des Zusammenspiels von unternehmensinhärentem Entscheidungsverhalten und internen sowie externen Einflüssen dargestellt (Abbildung 12.3). Das Modell baut wie die empirische Befragung auf dem dreiphasigen Untersuchungskonzept auf, das im Kapitel zur Entscheidungsfindung bezüglich gRWA vorgestellt wurde. Zugleich werden die Phasen 1 (Grundsätzliche Nutzungsentscheidung) und Phase 2 (Technologiewahl) weiter ausdifferenziert. Die Wohnungsunternehmen werden als selbstständige Agenten begriffen. Die im Mittelpunkt stehenden Entscheidungen beziehen sich auf die Immobilien – entsprechend wird jahresweise für jede Immobilie geprüft, ob eine gRWA errichtet werden

soll und welche Technologie genutzt wird. Sobald Immobilien einmal mit gRWA ausgestattet sind, werden diese nicht weiter betrachtet.

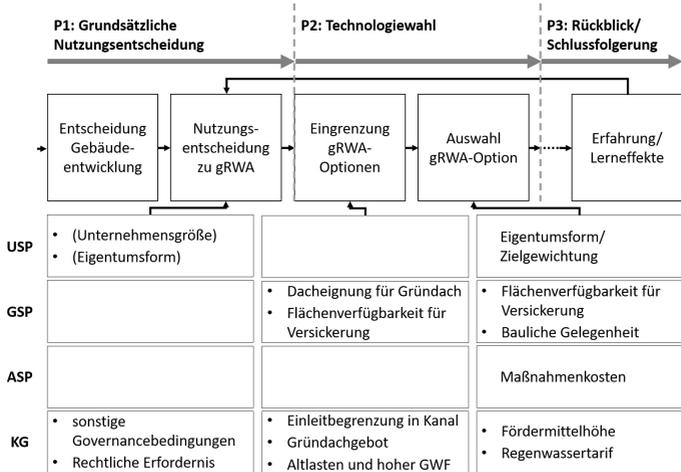


Abbildung 12.3.: Agentenbasiertes Konzeptmodell zur Nutzungsentscheidung von Wohnungsunternehmen gegenüber gRWA. Eigener Entwurf; USP – Unternehmensspezifische Einflüsse; GSP – Grundstücks- und gebäudespezifische Einflüsse; ASP – Anlagenspezifische Einflüsse; KG – Kommunale Governance

Grundsätzliche Nutzungsentscheidung

Die grundsätzliche Nutzungsentscheidung der WU wird als Wahrscheinlichkeit beschrieben:

$$\mathbb{P}(gRWA) = \sum_{\text{Gelegenheit } j} \mathbb{P}_{E.,sGov.,R.}(gRWA|G_j) * \mathbb{P}(G_j) \quad (12.1)$$

mit $\mathbb{P}(gRWA|G_j)$ als Nutzungswahrscheinlichkeit von gRWA zu den verschiedenen Gelegenheiten (G_j = Neubau, Sanierung/Modernisierung bzw. unabhängig von baulichen Gelegenheiten). Darüber hinaus wirken weitere interne und externe Einflüsse, wie die rechtliche Erfordernis ($R.$),

die sonstigen Governancebedingungen (*sGov.*) und Erfahrung (*E.*). $P(G_j)$ erfasst die Wahrscheinlichkeit, mit der die Gelegenheiten eintreten. Zur Operationalisierung werden Literaturinformationen, wie Neubau- und Modernisierungsraten oder stadtteilbezogene Annahmen herangezogen. Die empirischen Ergebnisse (Tabelle 12.3 und Abbildung 12.1) können die Wirkung der externen und internen Faktoren spezifizieren, z. B.:

- Die Wirkung der rechtlichen Erfordernis (*R.*) ist bei Neubau dreimal höher als bei Sanierung/Modernisierung oder im gelegheitsunabhängigen Fall.
- Die Erfahrung (*E.*) im Umgang mit gRWA fließt unabhängig von der Gelegenheit ein.
- Eine positive Beurteilung der sonstigen Governance (*sGov.*) fördert gRWA bei den baulichen Gelegenheiten (Neubau, Sanierung/Modernisierung) leicht.
- Die Wahrscheinlichkeit der Nutzung von gRWA liegt insgesamt bei Neubau höher als bei den anderen betrachteten Gelegenheiten.

Die Wirkung von Eigentumsform (höhere Nutzungsraten durch Genossenschaften, kommunale Unternehmen) und von innovativen Unternehmen (Unternehmensgröße) wurde zwar nicht empirisch bestätigt, sollte aber über Szenarienläufe eines Modells in der Wirkung getestet werden.

Technologiewahl und Lerneffekte

Aufgrund der Governancebedingungen sowie durch grundstücks- und gebäudespezifische Restriktionen stehen die verfügbaren gRWA-Optionen nicht bei allen Immobilien zur Wahl. Im Modell betrachtet werden (i) der vollständige Anschluss an den öffentlichen Kanal (Null-Variante); (ii) die Teilabkopplung durch ein Gründach; (iii) die vollständige Abkopplung durch Ergänzung eines Gründachs um Versickerungslösung; (iv) eine Teilabkopplung durch Versickerungslösung und (v) die vollständige Versickerungslösung des Regenwassers. Der erste Schritt der Technologiewahl besteht im Eingrenzen der konkret nutzbaren Technologieoptionen (GSP und KG in Abbildung 12.3). In Abhängigkeit grundstücks-/gebäudespezifischer oder institutioneller Beweggründe werden die gRWA-Optionen in fünf Schritten ausgeschlossen bzw. vorgeschrieben:

- Gründach – nur bei flachen Dachflächen nutzbar. Informationen bieten 3D-Modelle der Kommunen bzw. Gründachpotentialkarten.
- Gründach – wird vorgeschrieben durch entsprechende Satzungen.
- Vollständige Abkopplung – nicht bei Gebäuden umsetzbar, die direkt an die Straße grenzen. Siedlungsstrukturtypenkarten helfen, Strukturen wie Blockrandbebauung u. Ä. abzugrenzen.
- Vollständiger Verbleib am Kanal – nicht verfügbar bei Einleitbegrenzungen aufgrund von kommunalen Vorschriften bzw. entsprechenden Restriktionen des Abwasserentsorgers.
- Versickerung – nicht nutzbar bei zu hohen Grundwasserständen oder bei Altlastenverdacht. Hier ist die Verfügbarkeit entsprechender Karteninformationen zu prüfen.

Aus den verbleibenden gRWA-Optionen wird die Vorzugsvariante ausgewählt (Abbildung 12.3). Es wird angenommen, dass die Entscheidung der WU von den entstehenden Kosten, den Nutzen für die Mieter:innen sowie den ökologischen Wirkungen beeinflusst wird. Die Kosten (K_{WU}), die den WU selbst erwachsen werden beschrieben durch:

$$K_{WU} = (1 - F_{TO}) * AHK_{TO} + \sum_{t=1}^{ND} (FK + BK_{TO} - NK_{TO} - U_{G_j,TO}) * d_{t,n} \quad (12.2)$$

und ergeben sich somit aus den Anschaffungs- und Herstellungskosten (AHK_{TO}) der gRWA, bereinigt um Förderungsanteil (F_{TO}), sowie den Betriebs- (BK_{TO}) und Finanzierungskosten (FK). Über Kostenumlagen können die WU Teile der AHK auf die Mieter:innen umlegen ($U_{G_j,TO}$) bzw. die Betriebskosten über die Nebenkosten (NK_{TO}). Die Kosten sind als Barwerte mit dem Diskontierungsfaktor $d_{t,n} = (t + i_n)^{-t}$ dargestellt (i_n – individuelle Diskontrate, t – Zeit bis zum Ende der Nutzungsdauer ND). Sowohl die Technologieoption (TO) als auch die Gelegenheit (G_j) beeinflussen die Kosten. Zweitens profitieren Mieter:innen (*Mieter:innen Nutzen* – N_M) von eingesparten RW-Entgelten (ΔRWE_{TO}), müssen aber zugleich die umgelegten Kosten (NK_{TO}) und ($U_{G_j,TO}$) tragen.

$$N_M = \sum_{t=1}^{ND} (\Delta RWE_{TO} - NK_{TO} - U_{G_j,TO}) * d_{t,n} \quad (12.3)$$

Drittens werden ökologische Wirkungen berücksichtigt, indem der Abkopplungsgrad der versiegelten Fläche für die betrachteten Grundstücke herangezogen wird. Die Bewertung erfolgt als Nutzwertanalyse. Die Gewichtung der drei Kriterien variiert in Abhängigkeit von der Eigentumsform. Es wird angenommen, dass zwar die Kosten für die WU die Entscheidung dominieren, dass aber kommunale WU und Genossenschaften im Vergleich zu den privatwirtschaftlichen WU mehr Wert auf die wirtschaftlichen Wirkungen für die Mieter sowie auf die ökologischen Wirkungen legen (siehe Beitrag zur Entscheidungsfindung bezüglich gRWA). Auf eine Berücksichtigung der Verkehrssicherheit wird verzichtet. Zur Bemessung der Versickerungslösungen wird auf modellbasierte Bemessungsregeln zurückgegriffen.¹¹

$$AV_{TO,K_f} = \begin{cases} 0,2878 * AU^{-0,559}, & \text{TO = Flächenversickerung} \\ 0,0137 * AU^{-1,542}, & \text{TO = Muldenversickerung} \\ 0,008 * AU^{-1,334}, & \text{TO = Mulden-Rigolen-Versick.} \end{cases} \quad (12.4)$$

Die Gleichung beschreibt den relativen Anteil (AV_{TO,K_f}) am unversiegelten Netto-Flächenanteil (AU) des Grundstücks, der für die Versickerungsanlage notwendig ist.¹² Investitions- und Betriebskosten können der Literatur entnommen werden.¹³ Es wird auf die kostengünstigste Versickerungslösung zurückgegriffen, die die Flächenrestriktionen für das Grundstück einhält. Die an die Versickerungsanlage angeschlossene Fläche hängt von der Dachfläche und weiteren versiegelten Flächen (z. B. Stellflächen) ab, von der Nutzung alternativer gRWA (z. B. Gründach) und von der Entscheidung bzgl. der teilweisen oder vollständigen Abkopplung des Grundstücks. Die rückblickenden Lerneffekte und Erfahrung für weitere Entscheidungen (Phase 3) werden stochastisch beschrieben. Nach einer erstmaligen Errichtung von gRWA erhöht sich deren Nutzungswahrscheinlichkeit in Phase 1.

¹¹Vgl. van Afferden u. a., im Erscheinen, S. 56-57.

¹²Beispielhaft für einen gut versickerungsfähigen Boden ($K_f = 10^{-4}m/s$).

¹³Vgl. van Afferden u. a., im Erscheinen, S. 60; Geyley u. a., im Erscheinen, S. 95-99; diese Quellen enthalten auch Kostenangaben für Gründächer.

Zusammenfassung

Der Beitrag konkretisiert die konzeptionelle Beschreibung des Nutzungsverhaltens von WU gegenüber gRWA mithilfe einer quantitativen deutschlandweiten Erhebung, und er formalisiert anschließend die Erkenntnisse als Konzeptmodell für eine agentenbasierte Simulation. Grundlage bildet das dreiphasige Entscheidungskonzept aus dem Beitrag zur Entscheidungsfindung bezüglich gRWA. Noch stark vereinfacht beschreibt es die Nutzung von gRWA durch WU als eine eher durch externe Faktoren vorangetriebene und an bauliche Zyklen, insbesondere an Neubau, gekoppelte Entwicklung ("Wann?"), die durch die zunehmende Erfahrung mit gRWA stabilisiert wird ("Welche Lerneffekte?") und bei der die genutzten Technologien das Ergebnis unternehmerischer Rationalität vor dem Hintergrund zahlreicher externer und interner Einflüsse ("Welche Anlage?") sind. Noch offen sind die Implementierung des Modells und seine Validierung. Auch konnte z. B. der Einfluss unterschiedlicher Marktsegmente noch nicht geklärt werden und es fehlt die konzeptionelle Betrachtung sozialer Netzwerke, in die WU eingebettet sind. Dies betrifft sowohl die Beiträge von Innovationspionieren unter den WU als auch die Entscheidungseinflüsse, die sich durch informatorische Beziehungen zu kommunalen Ämtern einerseits und Ingenieurbüros u. Ä. andererseits ergeben.

Danksagung

Die Autoren danken allen Wohnungsunternehmen sowie den Wohnungsdachverbänden und Experten für ihre Unterstützung bei der empirischen Erhebung. Weiterhin danken sie S. Johanning und D. Abitz herzlich für ihre Unterstützung bei der Formulierung des Konzeptmodells. Dieser Beitrag wurde finanziert durch das Projekt „Smart Utilities and Sustainable Infrastructure Change“ (Antragsnummer 100378087 (SAB)).

Diese Maßnahme wird mitfinanziert durch Steuermittel auf der Grundlage des vom Sächsischen Landtag beschlossenen Haushaltes.



DOI: <https://doi.org/10.30819/5413.12>

Literatur

- Castonguay, A. C., M. S. Iftekhar, C. Urich, P. M. Bach und A. Deletic (2018). »Integrated modelling of stormwater treatment systems uptake«. In: *Water Research* 142, S. 201–312. DOI: 10.1016/j.watres.2018.05.037.
- Dijkema, G. P. J., Z. Lukszo und M. P. C. Weijnen (2013). »Introduction«. In: *Agent-Based Modelling of Socio-Technical Systems*. Hrsg. von K. H. van Dam, I. Nikolic und Z. Lukszo. Dordrecht: Springer Netherlands, S. 1–8.
- Geyler, S., T. Sahlbach, E. Hofmann, T. Wüstneck und T. Ziegenbein (im Erscheinen). »Wirkung der ortsnahen Regenwasserbewirtschaftung im Quartier«. In: *Wege zum abflussfreien Stadtquartier – Potentiale, Wirkungen und Rechtsrahmen des ortsnahen Schmutz- und Regenwassermanagements: FKZ 3716 15 333 o*. Hrsg. von Umweltbundesamt. Dessau - Roßlau, S. 79–119.
- Johanning, S., F. Scheller, D. Abitz, C. Wehner und T. Bruckner (2020). »A modular multi-agent framework for innovation diffusion in changing business environments: conceptualization, formalization and implementation«. In: *Complex Adaptive Systems Modeling* 8.1. DOI: 10.1186/s40294-020-00074-6.
- Kiesling, E., M. Günther, C. Stummer und L. M. Wakolbinger (2012). »Agent-based simulation of innovation diffusion: a review«. In: *Central Europ. Journal of Operations Research* 20.2, S. 183–230. DOI: 10.1007/s10100-011-0210-y.
- Lu, Z., D. Noonan, J. Crittenden, H. Jeong und D. Wang (2013). »Use of impact fees to incentivize low-impact development and promote compact growth«. In: *Environmental science & technology* 47.19, S. 10744–10752. DOI: 10.1021/es304924w.
- Montalto, F. A. u. a. (2013). »Decentralised green infrastructure: the importance of stakeholder behaviour in determining spatial and temporal outcomes«. In: *Structure and Infrastructure Engineering* 9.12, S. 1187–1205. ISSN: 1573-2479. DOI: 10.1080/15732479.2012.671834.
- Nikolic, I., K. H. van Dam und J. Kasmire (2013). »Practice«. In: *Agent-Based Modelling of Socio-Technical Systems*. Hrsg. von K. H. van Dam, I. Nikolic und Z. Lukszo. Dordrecht: Springer Netherlands, S. 73–137.
- Rounsevell, M. D. A., D. T. Robinson und D. Murray-Rust (2012). »From actors to agents in socio-ecological systems models«. In: *Philosophical transactions of the Royal Society of London. Series B, Biological sciences* 367.1586, S. 259–269. DOI: 10.1098/rstb.2011.0187.
- Senatsverwaltung für Umwelt, Verkehr und Klimaschutz Berlin, Hrsg. (2018). *Begrenzung von Regenwassereinleitungen bei Bauvorhaben in Berlin: BRWa-BE*. Berlin. URL: https://www.berlin.de/sen/uvk/_assets/umwelt/wasser-und-geologie/publikationen-und-merkblaetter/hinweisblatt-brewa-be.pdf.
- van Afferden, M., G. Khurelbaatar und M. Ueberham (im Erscheinen). »Modellhafte Auswahl integrierter Regenwasser-Managementkonzepte«. In: *Wege zum abflussfreien Stadtquartier – Potentiale, Wirkungen und Rechtsrahmen des ortsnahen Schmutz- und Regenwassermanagements: FKZ 3716 15 333 o*. Hrsg. von Umweltbundesamt. Dessau - Roßlau, S. 36–61.

Appendix

Glossar

- BDI:** Belief-Desire-Intention, Beschreibungsmodell für die Entscheidungsfindung des Menschen.
- CAG:** ConsumerAgentGroup, Gruppe von Agenten von Konsumenten.
- Diskretes Zeitmodell:** Zeitmodell, welches auf einer festen Folge von Zeitpunkten beruht.
- DSM:** Demand Side Management.
- DV:** Daseinsvorsorge.
- EE:** Erneuerbare Energien.
- EVS:** Energieversorgungssystem.
- EVU:** Energieversorgungsunternehmen.
- Framework:** beschreibt ein Programmiergerüst.
- Generalisierung:** beschreibt die Vererbung von Eigenschaften eines allgemeinen Objektes auf abgeleitete Objekte.
- Gerichteter Graph:** Graphen, bei denen die Verbindungen eine Richtung haben.
- GK:** Größenklasse.
- Graph:** Struktur, welche aus einer Menge von Objekten besteht, welche miteinander verbunden sein können.
- gRWA:** grundstücksbezogene Regenwasserbewirtschaftungsanlage.
- GuD:** Gas- und Dampf.
- Integral:** aus einer Komponente bestehend.
- KU:** kommunales Unternehmen.
- MaStR:** Marktstammdatenregister.
- Modular:** aus mehreren Komponenten bestehend.
- Objektorientierte Programmierung:** Programmierparadigma, bei der die Grundstruktur an der Wirklichkeit ausgerichtet ist.
- PV:** Photovoltaik.
- RW:** Regenwasser.
- Synchronisation:** Zeitliche Koordination von parallelen Abläufen zur Verhinderung von Wettlaufsituationen.

Systemagent: Agenten, welche keine realen Akteure repräsentieren und die Simulation steuern.

UML: Unified Modeling Language, Modellierungssprache zur graphischen Spezifikation.

Wettlaufsituation: engl. race condition, wenn das Ergebnis von einer zeitlichen Abfolge von Aktion abhängt; kann zu unerwarteten Ergebnissen führen.

WU: Wohnungsunternehmen.

Der hier vorliegende Band 12 der Schriftenreihe „Studien zu Infrastruktur und Ressourcenmanagement“ gibt zusammenfassend die wesentlichen Ergebnisse wieder, die im Rahmen des interdisziplinären Verbundprojektes „Smart Utilities and Sustainable Infrastructure Change“ erzielt werden konnten. Im Zentrum dieses Projektes stand die Entwicklung von innovativen agentenbasierten Computermodellen zur Beratung von kommunalen Ver- und Entsorgungsunternehmen im Kontext der Dekarbonisierung der Energieversorgung, des Klimawandels und der mit demographischen Veränderungen verbundenen infrastrukturbezogenen Herausforderungen.

Das Institut für Infrastruktur und Ressourcenmanagement (IIRM) der Universität Leipzig verfolgt einen integrativen Ansatz, der die ökonomischen, ökologischen und sozialen Aspekte eines nachhaltigen Ressourcenmanagements in allen relevanten Bereichen (Energie/Wasser/Fläche/Abfall) gleichermaßen adressiert. Die am IIRM durchgeführte Forschung ist anwendungsorientiert und darauf ausgerichtet, umweltpolitischen und energiewirtschaftlichen Entscheidungsträgern auf betrieblicher, kommunaler, nationaler und globaler Ebene eine wissenschaftsbasierte Beratung bei der Lösung zukünftiger Infrastrukturprobleme anbieten zu können.