

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 Expertenurfrage 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.

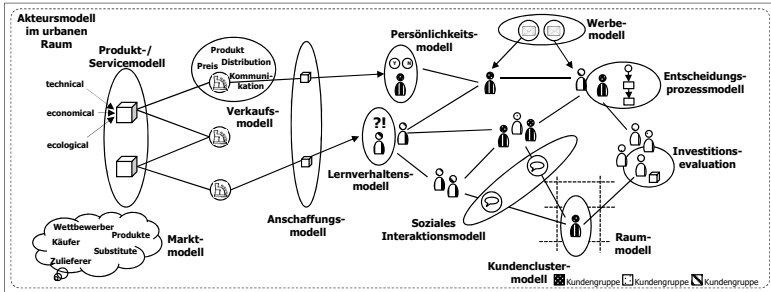


Abbildung 1.1.: Illustratives Zusammenspiel von Modellentitäten und -dynamiken in einem Akteursmodell zur Simulation von Investitions- bzw. Adoptionsentscheidungen von Endkunden. Quelle: Scheller, Johanning u. a., 2018.

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.