



**SteuerBoard
Energie**

Steuerungsmechanismen
im polyzentrischen
Energiesystem der Zukunft

ARBEITSPAPIER

Swantje Gährs, Hannes Bluhm, Leonie Küttemeyer

NACHHALTIGE DIGITALISIE- RUNG EINER DEZENTRALEN ENERGIEWENDE

Stand der Forschung, relevante Fragestellungen
und aktuelle Herausforderungen

APRIL 2022

PROJEKTPARTNER



i | ö | w
INSTITUT FÜR ÖKOLOGISCHE
WIRTSCHAFTSFORSCHUNG

ECOLOG 
INSTITUT FÜR SOZIAL - ÖKOLOGISCHE
FORSCHUNG UND BILDUNG gGmbH

FÖRDERER

GEFÖRDERT VOM



Bundesministerium
für Bildung
und Forschung

FONA
Sozial-ökologische Forschung

Impressum

Autor*innen:

Gährs, Dr. Swantje (IÖW); Bluhm, Hannes (IÖW); Kütemeyer, Leonie (ECOLOG)

Projektleitung:

Institut für ökologische
Wirtschaftsforschung (IÖW)
Potsdamer Str. 105, 10785 Berlin
www.ioew.de

Leuphana Universität Lüneburg
Institut für Nachhaltigkeitssteuerung
Universitätsallee 1, 21335 Lüneburg
www.leuphana.de/institute/insugo.html

Dr. Swantje Gährs
Telefon: + 49 (30) 884 594 59
Fax: + 49 (30) 882 54 39
E-Mail: swantje.gaehrs@ioew.de

Dr. Lars Holstenkamp
Telefon: + 49 (4131) 677 1931
Fax: + 49 (4131) 677 2167
E-Mail: holstenkamp@leuphana.de

Kooperationspartner:

ECOLOG - Institut für sozial-ökologische Forschung und Bildung
Büro Lüneburg
Wichernstraße 34, 21335 Lüneburg
www.ecolog-institut.de

Der vorliegende Beitrag entstand im Forschungsprojekt „SteuerBoard Energie – Steuerungsmechanismen im polyzentrischen Energiesystem der Zukunft“. Die Nachwuchsgruppe wird vom Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) in der Fördermaßnahme „Nachwuchsgruppen in der Sozial-ökologischen Forschung“ über einen Zeitraum von fünf Jahren (2020-2025) gefördert und ermöglicht in diesem Zeitraum die wissenschaftliche Qualifikation von sechs Mitgliedern der Nachwuchsgruppe über Habilitationen und Promotionen.

Für nähere Informationen zum Projekt: www.steuerboard-energie.org

Zusammenfassung

Dieses Arbeitspapier beschäftigt sich mit der nachhaltigen Digitalisierung einer dezentralen Energiewende und den Auswirkungen auf technische Prozesse, Geschäftsmodelle und Partizipationsprozesse. Es hat zum Ziel den Stand der Forschung darzustellen und aus Nachhaltigkeitssicht relevante Aspekte näher zu beleuchten. Der Einsatz der Digitalisierung verfolgt je nach Akteur und Umsetzung verschiedene Ziele wie die Komplexitätsreduktion, Effizienzerhöhung oder digitale Partizipation. Abhängig von dem vorrangigen Ziel ist der Einsatz bestimmter digitaler Technologien, Tools und Methoden an unterschiedlichen Stellen im Energiesystem sinnvoll. So werden bestehende Prozesse in der Energiewirtschaft digitalisiert und optimiert, es werden Geschäftsmodelle durch Einsatz der Digitalisierung weiter- oder neu entwickelt und es werden digitale Tools in Energiewendeprozessen eingesetzt. Die Motivation dafür ist neben betriebswirtschaftlichen Interessen oft ökologisch (z. B. mehr Effizienz oder Suffizienz) oder sozial (z. B. mehr Partizipation und Transparenz) begründet. Die Auswirkungen sind aus Nachhaltigkeitssicht jedoch vielfältig und häufig noch nicht vollständig erforscht. So ist der Energie- und Ressourceneinsatz durch die Digitalisierung eine relevante Größe zur Bewertung der ökologischen Bilanz, aber auch die Frage der Resilienz und Vulnerabilität durch die Verknüpfung von digitaler und elektrischer Infrastruktur ist wichtig für die Bewertung des Einsatzes der Digitalisierung. Bei den sozialen Aspekten wie Mitbestimmung, Transparenz, Akteursvielfalt und Partizipation sind aktuell positive und negative Trends zu beobachten. In einigen Anwendungsfällen schafft die Digitalisierung hier einen Mehrwert. Es besteht aber auch die Gefahr, dass es ungewollt zu Intransparenz oder Exklusivität kommt.

Über die Nachwuchsgruppe

Damit die Energiewende in Deutschland gelingt, muss das Energiesystem neu ausgestaltet werden: Zum einen müssen viele dezentrale Akteure eingebunden sowohl technisch als auch organisatorisch werden. Zum anderen muss das neu entstehende polyzentrische Energiesystem nachhaltig ausgestaltet sein – bei der Steuerung sollten also übergeordnete Regeln eine ökologische, ökonomische und sozial gerechte Umsetzung der Energiewende in den Vordergrund stellen. Wie müssen sich aktuelle Rahmenbedingungen und Institutionen hierfür verändern? Die durch das Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) im Rahmen der sozial-ökologischen Forschung geförderte Nachwuchsgruppe „SteuerBoard Energie“ untersucht diese Frage in sechs Qualifikationsarbeiten. Auf Basis des Konzepts einer polyzentrischen Governance untersuchen die Forschenden zwei besonders relevante Einflüsse in der Transformation als Schwerpunktthemen: Digitalisierung und Finanzierung. Im Bereich Digitalisierung geht es um die Frage, welche Nachhaltigkeitspotenziale die Digitalisierung im Energiebereich mit sich bringt und inwieweit damit auch polyzentrische Ansätze unterstützt oder ermöglicht werden. Mit Blick auf die Finanzierung der Energiewende untersucht das Forschungsteam Institutionen und Akteure, rechtliche Rahmenbedingungen und beleuchtet insbesondere mögliche Finanzierungslösungen für den Ausbau dezentraler erneuerbarer Energien.

Inhaltsverzeichnis

1	Einführung	7
2	Transformation des Energiesystems und die Rolle der Digitalisierung	9
3	Digitalisierung von Prozessen im Energiesystem	12
3.1	Daten, digitale Technik und Infrastruktur	12
3.2	Digitale Technologien und ihre Möglichkeiten	15
3.3	Chancen und Herausforderungen beim Einsatz digitaler Technik und Technologien	20
4	Digitale Geschäftsmodelle und digitale Energiegemeinschaften	22
4.1	Auswirkungen der Digitalisierung auf Geschäftsmodelle in der Energiewirtschaft	22
4.2	Formen digitaler Energiegemeinschaften	26
4.3	Herausforderungen und Risiken von digitalen Energiegemeinschaften	31
5	Digitale Produkte und Tools in kommunalen Prozessen	33
5.1	Formen von Beteiligung und die Rolle digitaler Tools	33
5.2	Differenzierung digitaler Tools zur Partizipation im Kontext der Energiewende	36
5.3	Chancen und Risiken digitaler Teilhabeformate	41
	Literaturverzeichnis	43

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1:	Dimensionen der Digitalisierung und ihrer Auswirkungen	8
Abbildung 2:	Beispiel für die Kommunikationsstruktur zwischen Netzbetreiber und dezentralen Energieanlagen	14
Abbildung 3:	Übersicht zu Geschäftsmodellklassen der Energiewende	25
Abbildung 4:	Formen von digitalen Energiegemeinschaften	27
Abbildung 5:	Kategorisierung (digitaler) Beteiligungselemente	35

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1:	Beispiele für den Einsatz von digitalen Technologien im Energiesystem	19
Tabelle 2:	Systematisierung von Gestaltungsoptionen digitaler Geschäftsmodelle	24
Tabelle 3:	Beispiele für den Einsatz von digitalen Tools im energiepolitischen Kontext	40

Abkürzungsverzeichnis

AR	Augmented Reality
BDEW	Bundesverband der Energie- und Wasserwirtschaft
BNetzA	Bundesnetzagentur
BSI	Bundesamt für Sicherheit in der Informationstechnik
CLS	Controllable Local System
EU	Europäische Union
GIS	Geografische(s) Informationssystem(e)
HTML	Hypertext Markup Language
IKT	Informations- und Kommunikationstechnologie
IoE	Internet of Energy
IoT	Internet of Things
KI	Künstliche Intelligenz
MSR	Mess-, Steuer- und Regelungstechnik
PV	Photovoltaik
P2P	Peer-to-Peer
SMGW	Smart-Meter-Gateway
VR	Virtual Reality

1 Einführung

Die sozial-ökologische Transformation des Energiesystems lässt sich anhand von den sogenannten vier D's betrachten: der Dekarbonisierung, der Dezentralisierung, der Demokratisierung und der Digitalisierung (Di Silvestre et al. 2018; Götz 2020; Soutar 2021; Stephens 2019). Die Dekarbonisierung zur Erreichung des 1,5-Grad-Ziels ist mit dem Pariser Abkommen bereits politisch beschlossen. In Deutschland wird dafür im Klimaschutzprogramm 2030 ein Ausbau der erneuerbaren Energien von 65 Prozent bis 2030 angestrebt, die neue Bundesregierung bekennt sich im Koalitionsvertrag sogar zu einem Ausbau der erneuerbaren Energien von 80 Prozent bis 2030 (O A 2019; SPD/GRÜNE/FDP 2021). Die Energieeffizienzstrategie 2050 zielt zudem auf eine Reduktion des Energieverbrauchs um 30 Prozent bis 2030 ab (BMW 2019). Die Dezentralisierung ist durch den Ausbau der erneuerbaren Energien auf der Erzeugungsebene bereits vorangeschritten und muss zum Erreichen der Ausbauziele noch deutlich steigen. Damit einher geht auch, dass durch die lokale Energieversorgung in Form von Microgrids, Prosumer und Energiegemeinschaften deutlich mehr Steuerung auf der Ebene der Verteilnetze notwendig ist. Wie dezentral die Energiewende am Ende wirklich werden soll oder muss, ist eine noch stark umstrittene Frage (Bauknecht et al. 2015; Witte et al. 2020). Ähnliches gilt für das Thema der Demokratisierung, die ein sehr breites Feld beschreibt. Hierzu zählen zum einen ebenfalls Prosumer oder Energiegemeinschaften, die ihre Energieerzeugung selber in die Hand nehmen (Horstink et al. 2020; Wittmayer et al. 2022; Wittmayer et al. 2021). Ebenso adressiert werden müssen für eine Transformation jedoch Fragen von Mitbestimmung, Transparenz und Akzeptanz der Bürger*innen (Holstenkamp und Radtke 2018; Knodt et al. 2019; Schönhuth und Jerrentrup 2019). Eng mit all diesen Themen verknüpft ist die Digitalisierung, die häufig als Hoffnungsträger für die Umsetzung einer erneuerbaren, dezentralen, demokratischen Energieversorgung und „Megatrend“ diskutiert wird (vgl. BDEW 2017a; BMW 2015; IEA 2017; Lied 2017; Maier 2018; Roth 2018). Denn sie soll durch die intelligente Steuerung von Anlagen ein dezentrales Energiesystem ermöglichen, durch Prognosen und Flexibilitäten die Dekarbonisierung mit einem vollständig auf erneuerbaren Energien basierenden Energiesystem ermöglichen und durch die sowohl technische als auch marktliche Einbindung deutlich kleinerer Erzeuger auch die Demokratisierung vorantreiben. Die Möglichkeiten der Digitalisierung im Energiesystem, ihre Interdependenzen mit den anderen Themen, aber auch die Risiken, die die Digitalisierung an manchen Stellen mit sich bringt, werden in diesem Arbeitspapier anhand verschiedener Schwerpunkte diskutiert.

Um sich dem Thema „Digitalisierung“ aber zu nähern, braucht es zunächst eine differenzierte Betrachtung, was unter dem Begriff Digitalisierung zu verstehen ist. Dafür wird in diesem Arbeitspapier zwischen den Begriffen Digitalisierung, digitale Transformation und digitaler Wandel unterschieden (vgl. Abbildung 1). Da diese Begriffe in der Literatur nicht trennscharf verwendet werden, werden hier die Unterschiede noch einmal dargestellt werden.

- Unter dem Begriff der **Digitalisierung** (engl. digitization) wird zunächst nur die Veränderung von analogen Signalen hin zu digitalen Daten verstanden (Bengler und Schmauder 2016; Bonn 2018), z. B. eine digitale Erfassung von Stromverbräuchen mit Smart Metern im Gegensatz zu analogen Ferraris-Zählern.

- Die **digitale Transformation** (engl. digitalization) hingegen beschreibt Veränderungen in der Wirtschaft oder Institutionen, die sich durch die Digitalisierung ergeben oder erst ermöglicht werden (Doleski 2017). Beispiele hierfür sind das automatisierte Ablesen und Abrechnen des Energieverbrauchs, Online-Solarkataster oder Smart Grids. Die digitale Transformation kann dabei u. a. für Unternehmen, Geschäftsmodelle, Prozesse, Beziehungen, Produkte erfolgen (Schallmo et al. 2017).
- Als gesellschaftliche Ebene der Veränderung wird der Begriff des **digitalen Wandels** (engl. digital transformation) genutzt (Bär 2018). Hier geht es vorrangig um die Wirkung und Konsequenzen der Digitalisierung auf die Gesellschaft, z. B. Möglichkeiten zur Partizipation, ökonomischen Teilhabe oder Selbstorganisation durch die Verbreitung bzw. die einfache Nutzung von Big Data, Plattformen oder Blockchains, aber auch deren negative Auswirkungen wie fehlende Inklusion oder Gerechtigkeit.

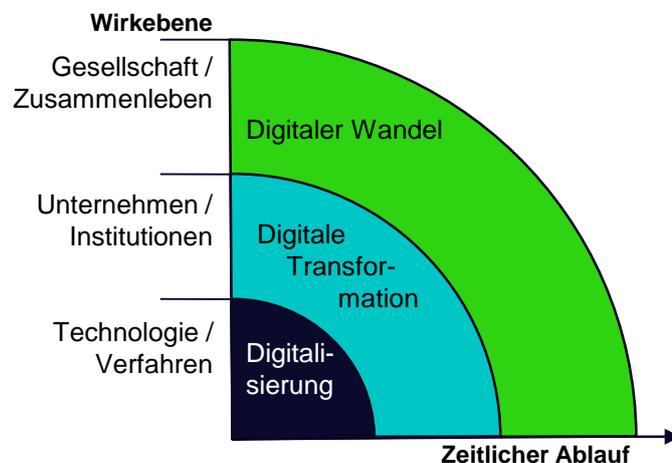


Abbildung 1: Dimensionen der Digitalisierung und ihrer Auswirkungen

Die Betrachtungen in diesem Arbeitspapier beziehen sich vor allem auf die digitale Transformation, die in den Institutionen und Unternehmen, die mit der Energiewirtschaft in Berührung stehen, vollzogen wird, und auf die gesellschaftlichen Auswirkungen, die sich bei einer Verbreitung durch den implizierten digitalen Wandel ergeben. Dabei wird von der Fragestellung ausgegangen, inwiefern die Digitalisierung zu einem dezentralen, oder eher polyzentrisch gesteuertem, Energiesystem beiträgt und welche positive oder negative sozial-ökologische Wirkung zu erwarten ist.

Das zweite Kapitel gibt zunächst einen Überblick zu den Hintergründen und den Auswirkungen der Digitalisierung im Energiesystem. Die Kapitel 3, 4 und 5 fokussieren jeweils exemplarisch auf ein Thema, bei dem die digitale Transformation eine besondere Rolle spielt und entscheidend für die Transformation sein kann oder zumindest als Game Changer adressiert wird. In Kapitel 3 wird insbesondere die Digitalisierung von Prozessen in der Transformation adressiert, wie sie zum Beispiel bei der automatisierten Flexibilisierung von dezentralen Akteuren im Rahmen von Smart Grids oder netzdienlich gesteuerten Endverbraucher*innen auftritt. Dabei werden auch die verschiedenen digitalen Technologien beleuchtet, die dabei zum Einsatz kommen. In Kapitel 4 werden digitale Geschäftsmodelle insbesondere im Bereich der Digitalen Energiegemeinschaften diskutiert. Diese Formen des virtuellen Zusammenschlusses von dezentralen Akteuren sind für die Betrachtung der sozial-ökologischen Wirkung besonders interessant, weil sie sich als disruptive Innovationsansätze

von den bewährten Geschäftsmodellen im Energiebereich abgrenzen und u. a. dazu beitragen können, über das Agieren von Unternehmungen erneuerbare Energie und Flexibilitäten bereitzustellen und zu koordinieren. Digitale Produkte und Tools, die Kommunen zur Entscheidungsfindung und Partizipation von Bürger*innen einsetzen können, sind Fokus in Kapitel 5. Hier findet die Digitalisierung auf einer kommunikativen Ebene statt und die Kommunen und Bürger*innen stehen als dezentrale Akteure im Mittelpunkt.

2 Transformation des Energiesystems und die Rolle der Digitalisierung

Die Digitalisierung wird als Enabler für die Energiewende gesehen, aber teilweise auch als einzige Möglichkeit für die Bewältigung der Komplexität in einem zunehmend dezentralen erneuerbaren Energiesystem. Die Komplexität entsteht dabei nicht nur durch die hohe Anzahl an fluktuierenden erneuerbaren Energien an verteilten Standorten, sondern auch durch die Vielzahl und Diversität der Akteure entlang der Wertschöpfungs- und Prozessketten. So müssen für kleine Akteure wie Prosumer oder Energiegemeinschaften und auch Betreiber größerer dezentraler Anlagen wie Regionalkraftwerke oder Windparks Lösungen für die Anbindung gefunden werden. Und für den weiteren Ausbau der erneuerbaren Energien müssen zudem viele Bürger*innen vor Ort mitgenommen werden, um eine ausreichende Akzeptanz zu erreichen (Knodt et al. 2019). Die Politik sieht die Digitalisierung als Notwendigkeit für die Energiewende und hat daher 2016 das Gesetz zur Digitalisierung der Energiewende (Bundestag 2016) beschlossen und dort den stufenweisen Smart-Meter-Rollout festgeschrieben, welcher sowohl eine weitreichende Datenerhebung im Stromverbrauch und zukünftig auch Wärmeverbrauch als auch eine sichere Datenkommunikation ermöglichen soll.

Allgemeine Chancen und Potenziale der Digitalisierung

Vor diesem Hintergrund werden der Digitalisierung viele positive Eigenschaften zugesprochen. Dazu gehört die Verbindung lokaler und regionaler Energiesysteme untereinander, um sie intelligenter, zuverlässiger, effizienter und nachhaltiger werden zu lassen, beispielsweise durch die Kopplung der Sektoren (z. B. Henning 2018; Mega 2019; Rehtanz 2015) sowie durch die Hebung von Flexibilität (Alizadeh et al. 2016; Kondziella und Bruckner 2016). Digitale Technologien im Energiebereich bieten zahlreiche Möglichkeiten für Unternehmen, das bestehende Geschäftsmodell zu verbessern oder neue Geschäftsmodelle zu entwickeln und damit neue Einkommensmöglichkeiten zu schaffen (Clauß und Laudien 2017; Loock 2020). Zudem ermöglicht die Digitalisierung durch die Übermittlung von Daten ohne Zeitverzug eine Abbildung der physikalischen Gegebenheiten im Netz auch im Strommarkt und dynamische Tarife für Endverbraucher*innen (z. B. zeit-, last-, ereignis- und verbrauchsvariable Tarife) (BDEW 2017a; Vortanz und Zayer 2017).

Durch Automatisierung und Optimierung von Prozessen können Umweltvorteile gegenüber nicht-digitalisierten Prozessen gehoben werden (z. B. durch Wetterprognosesteuerungen oder Predictive Maintenance, Live-Zustandsüberwachung von Netzelementen). Aber auch eine effizientere Nutzung von Energietechnologien kann durch die Digitalisierung erreicht werden (z. B. beim Multi-Use von Speichern). Darüber hinaus können digitale Technologien dazu führen, dass Nutzer*innen eigenmotiviert Geräte tauschen oder Energie einsparen (z. B. durch Visualisierungen und Hinweise

auf ineffiziente Geräte) und sich dadurch auch in anderen Lebens- und Konsumbereichen umweltbewusster verhalten (Gährs et al. 2021b; Pohl et al. 2019).

Die Digitalisierung birgt zudem Potenziale, mithilfe digitaler Tools betroffene Akteure und weitere Stakeholder besser in energiepolitische und energiewirtschaftliche Prozesse einzubeziehen. Digitale Plattformen und Tools zur Informierung, zur Teilhabe an der politischen Entscheidungsfindung oder zur Kund*innenbindung in neuen digitalen Geschäftsmodellen wird zugeschrieben, dass sie die Vernetzung und Einbindung einer Vielzahl an Akteuren vereinfachen und begünstigen können (Deckert et al. 2020; Rieger und Weber 2017; Spieker 2018).

Allgemeine Hemmnisse, Risiken und Herausforderungen der Digitalisierung

Gleichzeitig gibt es aktuell jedoch auch noch viele Hemmnisse, Risiken und Herausforderungen der Digitalisierung im Energiebereich. Dies betrifft sowohl ökonomische, ökologische, soziale als auch technische Aspekte. Ein Aspekt betrifft dabei die Verwundbarkeit eines digitalisierten Energiesystems. Durch die digitale Verknüpfung der Systeme und Akteure werden die Risiken bzw. die Auswirkungen von Angriffen auf das Energiesystem deutlich größer und bekommen durch die Abhängigkeit des Energiesystems von der digitalen Infrastruktur eine neue Qualität (Aretz et al. 2017; Blank-Babazadeh et al. 2021). Ein möglicher Ansatz dem entgegen zu wirken können dezentrale und zelluläre Ansätze sein (Hirschl et al. 2018), Datensuffizienz, d. h. der Einsatz und die Erhebung von Daten nur dort, wo sie auch notwendig sind (Hirschl et al. 2018), sowie die Diversifizierung der Infrastruktur und Technologien (Gährs et al. 2021a).

Digitalisierung geht einher mit direkten Energie- und Ressourcenverbräuchen zur Herstellung, Betrieb und Entsorgung von Informations- und Kommunikationstechnologie (IKT) und Hintergrundprozessen wie dem Datentransfer oder dem Infrastrukturbetrieb von Dienstleistern (Bordage et al. 2021; Coroama 2021; Gährs et al. 2021b). Damit stellt die Digitalisierung ein Umweltrisiko dar, wenn einer Anwendung keine ausreichend großen Energie- und Ressourceneinsparungen gegenüberstehen.

Neben diesen direkten Umweltauswirkungen können sich weitere Risiken durch indirekte Effekte der Digitalisierung ergeben. Durch eine veränderte Fahrweise von Energietechnologien, die durch Automatisierungs- und Optimierungsprozesse ausgelöst wird, können an einer Stelle Vorteile entstehen (z. B. zusätzliche Einnahmen für Dienstleister durch Multi Use von Speichern), die wiederum ungewollt technische Nachteile an anderer Stelle nach sich ziehen können (z. B. Verkürzung der Lebensdauer technischer Komponenten oder Wirkungsgradverluste). Zusätzlich können nutzungsbezogene Effekte im Zuge der Anschaffung digitaler Komponenten auftreten. Rebound-Effekte beschreiben den Umstand, dass erzielte finanzielle Vorteile, die digitale Anwendungen durch Effizienzgewinne generieren, für Mehrausgaben für umweltschädliche Produkte genutzt werden. Nachfrage induzierende Effekte beschreiben die Situation, dass die Anschaffung von Geräten völlig neue Bedarfe hervorbringen kann (z. B. Anschaffung von Tablets für allgemeinen Internetzugang und anschließende intensive Nutzung für Online-Spiele). Schließlich können sich Effekte auf Ebene einzelner Haushalte und Personen durch starke Verbreitung der Anwendung zu systemisch relevanten Effekten aufsummieren (Frick und Nguyen 2021; Gährs et al. 2021b; Lange et al. 2020; Pohl et al. 2019).

Digitale Geschäftsmodelle zeichnen sich einerseits durch bestimmte Vorteile und durch neue Einkommensmöglichkeiten aus. Andererseits ist das Interesse zum Markteintritt aufgrund hoher

Markteintrittsbarrieren für bestimmte Dienstleistungen im Energiebereich aktuell begrenzt (Gährs et al. 2021b). Wie bei Geschäftsmodellen oft beobachtbar, können darüber hinaus Netzwerkeffekte und „First-Mover-Vorteile“ erzielt werden, die den Markteintritt weiterer Anbieter behindern und zu einer Marktkonzentration auf wenige Akteure führen (Aagaard 2019; Hages et al. 2017).

Teilweise erschweren die fehlende Infrastruktur und der schleppende Breitbandausbau schon die Voraussetzungen für eine breite Digitalisierung. Laut Bundesministerium für Verkehr und Infrastruktur (BMVI 2019) lässt sich bei der Breitbandverfügbarkeit noch ein Stadt-Land-Gefälle erkennen. Während bei den unteren Bandbreiten (<16 Mbit/s) die Unterschiede geringer ausfallen, sind bei höheren Bandbreitenklassen (>1.000 Mbit/s) noch deutliche Differenzen zu erkennen. Neben den technologischen Voraussetzungen sind auch der Zugang zu digitaler Technik und damit verbunden digitalen Medien, wie dem Internet, Softwareprogramme oder Social Media sowie die Fähigkeiten und Kompetenzen im Umgang mit ihnen in der Gesellschaft noch ungleich verteilt. Die Ebene des Zugangs hängt häufig mit sozio-demographischen Merkmalen zusammen und kann zu Nachteilen bei der Teilhabe an gesellschaftlichen Prozessen beitragen (Rudolph 2019). Dieses Phänomen wird daher häufig als „digital divide“ bezeichnet.

Daneben verzögert sich auch der Ausbau von Smart Metern zunehmend. Nachdem 2016 das Gesetz zur Digitalisierung der Energiewende verabschiedet wurde, wurden die für den Start des Rollouts notwendige Zertifizierung von drei Smart-Meter-Gateways (SMGW) erst Ende 2019 erreicht und die zugehörige Markterklärung des Bundesamts für Sicherheit in der Informationstechnik (BSI) Anfang 2020 veröffentlicht. Doch nach einer Klage wurde der Rollout im Frühjahr 2021 vom OVG Münster wieder gestoppt. Derzeit wird das Gesetz überarbeitet, um Rechts- und Planungssicherheit wiederherzustellen.

Zusammenhänge zwischen Digitalisierung und Polyzentrität

Neben einzelnen Aspekten der Dezentralisierung kann für das Energiesystem auch eine polyzentrische Governance interessant sein, in der die Akteure selbstorganisiert handeln. Die Digitalisierung kann hier ebenfalls eine unterstützende Technologie sein, indem automatisierte Entscheidungen unter Berücksichtigung von übergeordneten Regeln und Grenzen, bspw. in den Übertragungsnetzen, getroffen werden. Explizit oder implizit wurden in der Literatur auch Zusammenhänge zwischen Digitalisierung und Polyzentrität betrachtet. Beispielsweise beschäftigt sich das Horizon-2020-Projekt Newcomers mit der Bedeutung von neuen, durch die Digitalisierung ermöglichten Energiegemeinschaften für die Polyzentrität (Mlinarič et al. 2019; van der Grijp et al. 2019). Der Fokus der Forschung liegt dabei auf praktischen Handlungsempfehlungen und der Umsetzung von innovativen Energiegemeinschaften in verschiedenen europäischen Ländern. Auch Moroni et al. (2019b) haben sich mit Aspekten der Polyzentrität im Energiesektor beschäftigt und den Übergang von passiven zu aktiven, selbstorganisierten Konsument*innen untersucht. Des Weiteren hat Bauwens (2017) analysiert, inwieweit selbstorganisierte Gemeinschaften technologische Innovationen für die Produktion, Speicherung und den gemeinschaftlichen Energieverbrauch fördern. Die bisherigen und geplanten Bemühungen urbane Räume mithilfe von Digitalisierung und Dezentralisierung zu dekarbonisieren, standen im Fokus der Untersuchungen von Webb et al. (2020).

Im Folgenden werden die Herausforderungen und Möglichkeiten der Digitalisierung anhand des Einsatzes digitaler Technologien zur technischen Steuerung, den digitalen Energiegemeinschaften und digitalen Tools in kommunalen Prozessen genauer beleuchtet.

3 Digitalisierung von Prozessen im Energiesystem

3.1 Daten, digitale Technik und Infrastruktur

Die Digitalisierung ist besonders für die Energiewirtschaft ein wichtiges Geschäftsfeld für die Zukunft, um sowohl interne als auch externe Prozesse zu verbessern. Schon in einer Umfrage von 2016 gaben 69 Prozent der Energieversorgungsunternehmen an, eine Digitalisierungsstrategie zu haben oder zu planen (BDEW 2016). In 2021 hatte auch schon mehr als jeder zweite Energieversorger diese implementiert (BDEW et al. 2021). Ein großer Treiber hierbei ist die Entwicklung neuer digitaler Technologien und die zunehmende Datenbasis (BDEW 2016).

Die Bundesregierung sieht ebenfalls die Notwendigkeit zur Digitalisierung und hat daher 2016 das Gesetz zur Digitalisierung der Energiewende beschlossen. Dieses regelt im Kern den Rollout der intelligenten Messsysteme (iMSys), d. h. die Kombination aus modernen Messeinrichtungen und Smart-Meter-Gateways. In § 29 ist dort grundsätzlich geregelt, dass Letztverbraucher mit mehr als 6.000 kWh/a und Anlagenbetreiber mit einer installierten Leistung über 7 kW mit einem iMSys auszustatten sind. Das Gesetz legt ebenso Fristen fest, innerhalb derer der Rollout erfolgen soll. Danach sollte der Rollout im Jahr 2017 beginnen und bis 2025 größtenteils abgeschlossen sein. Allerdings wurde in § 30 festgeschrieben, dass der Rollout erst beginnt, wenn durch das BSI mindestens drei Smart-Meter-Gateways zertifiziert wurden, die damit den Sicherheitsbedingungen der Bundesregierung entsprechen, und eine zugehörige Marktanalyse des BSI erfolgt ist. Durch Verzögerungen bei der Zertifizierung wurde dieser Zustand erst mit der veröffentlichten Marktanalyse im Januar 2020, d. h. mit drei Jahren Verzögerung hergestellt. Damit sind die Fristen zum Rollout erstmals gestartet. Aktuell sind diese jedoch pausiert, da bei einer Klage beim Oberverwaltungsgericht Münster vom März 2021 festgestellt wurde, dass die Umsetzung nicht rechtssicher ist. Es ist jedoch davon auszugehen, dass der verpflichtende Rollout in Kürze fortgesetzt wird.

Daten als Basis aller digitalen Technologien

Die Grundlage der Digitalisierung bilden Daten, die erhoben, übertragen, verarbeitet oder übermittelt werden. Das gilt nicht nur für das Energiesystem, sondern allgemein. Im Energiesystem ergeben sich jedoch aufgrund der Historie und der Relevanz für die Daseinsvorsorge einige Besonderheiten. Durch die ursprünglich zentrale Aufstellung des Energiesystems waren nur wenig Daten nötig und das Stromnetz konnte mittels analoger Signale gesteuert werden. Mittlerweile ist die Erhebung und Nutzung von großen Datenmengen bereits in einigen Bereichen, wie der Anlagensteuerung in virtuellen Kraftwerken oder Kund*innendaten für den Vertrieb, Alltag im Energiesystem (vgl. auch BDEW 2016). Durch das Gesetz zur Digitalisierung der Energiewende und die damit verbundenen Bestrebungen der Bundesregierung, eine intelligente Steuerung des Energiesystems anzustreben, steigt der Anteil der Daten, die im Energiesystem erhoben werden, täglich. Bereits 2016 hat der BDEW angegeben, dass „bei dem täglichen unternehmensübergreifenden Datenaustausch eines mittelgroßen Energieversorgungsunternehmens bis zu 30.000 Nachrichten mit ca. 1,6 TB Datenvolumen“ entstehen (BDEW 2016, S. 31).

Grob lassen sich die Daten im Energiesystem in zwei Kategorien einteilen: Systemdaten und Kund*innen-/Erzeuger*innendaten (Corusa et al. 2021; Rhodes 2020). Diese Unterteilung ist hilfreich, da diese Datentypen unterschiedlichen Aufgaben im Energiesystem übernehmen und damit

auch andere Zielstellungen haben. Unter Systemdaten werden alle Daten eingruppiert, die sich auf das gesamte Energiesystem oder relevante Teile davon beziehen. Dazu gehören Wetterprognosedaten, Marktdaten bspw. des Regelenergiemarkts, Anlagenstandorte oder Erzeugungsmengen. Unter Kund*innen- und Erzeuger*innendaten werden die Daten der Anschlussnutzer*innen gefasst. Dazu gehören also persönliche Daten, Verbrauchsdaten, Erzeugungs- und Lastprofile oder Daten zur Lastverschiebung (Rhodes 2020). Die Daten unterscheiden sich auch bzgl. des Datenschutzes, der von Corusa et al. (2021) differenziert beleuchtet wurde. Dabei lässt sich die Frage, wie weit bei den einzelnen Daten der Datenschutz greift, nicht nur anhand der Art der Daten beantworten, sondern muss auch den Zweck mit einbeziehen, dem diese Daten zugeführt werden sollen. Daneben gibt es insbesondere bei den Systemdaten auch Daten, die bspw. aus Gründen des Unbundlings nicht weitergegeben werden dürfen, um Wettbewerbsvorteile zu vermeiden. Da die Daten in einem zunehmend digitalisierten Energiesystem eine wichtige Rolle einnehmen, identifizieren Corusa et al. (2021) hier auch neue Geschäftsmodelle in der Beschaffung, Aufbereitung und Weitergabe von Daten.

Digitale Technik zur Erhebung, Verarbeitung und Speicherung von Daten

Zur Erhebung der Daten kommt diverse digitale Technik zum Einsatz. Die intelligenten Messsysteme (iMSys) sind dabei das zentrale Instrument zur Erhebung von Verbrauchs- und Erzeugungsdaten. Langfristig ist das iMSys über den CLS-Kanal (Controllable Local System) auch die Kommunikationsschnittstelle zur Steuerung und zur Einbindung von weiteren Erzeugungs- und Verbrauchstechnologien aus den Sektoren Wärme oder Mobilität (vgl. Gähns et al. 2021b). Damit unterteilt der Smart Meter die digitale Technik zwischen derjenigen Technik die hinter dem Zähler bei den Endkund*innen installiert ist und der Technik davor. Die Technik vor dem Zähler besteht vor allem aus Sensoren (z. B. Wetterdaten, Netzzustandsdaten, Daten zum Zustand der Erzeugungs- und Speicheranlagen) und Aktoren (z. B. pneumatisch, hydraulisch, thermisch oder elektrisch) zur Netz- und Systemsteuerung. Hinter dem Smart Meter befinden sich aber bei den zunehmend vernetzten Endkund*innen noch eine Reihe weiterer Sensoren (z. B. Temperatur, Feuchtigkeit, Helligkeit, Bewegung, Entfernung), Aktoren und Endgeräte (z. B. Smartphones, Tablets, Monitore) mit denen Daten händisch oder automatisch und gesammelt werden (Motlagh et al. 2020). Diese Daten werden dann entweder für einen Zweck innerhalb des internen Netzes (z. B. Monitoring) genutzt oder über den Smart Meter für andere Dienstleistungen weitergegeben. Die Energieerzeugungstechnologien wie auch Großverbraucher wie Wärmepumpen oder Elektroautos werden jedoch auch schon häufig über Wechselrichter, Wärmemengenzähler und Wallbox mit entsprechenden Datenloggern installiert und die Daten somit gesammelt und gespeichert.

Durch die immer weiter zunehmende Anzahl von Daten, werden für die Verarbeitung und Speicherung der Daten häufig Rechenzentren und Cloud Computing, also der virtuelle Zusammenschluss mehrerer Rechenzentren, genutzt. Laut BDEW et al (2021) nutzen bereits 85 Prozent der EVUs Cloud-Dienste. Dabei werden am meisten cloud-basierte Software-Dienste (Software-as-a-Service, SaaS) genutzt, danach folgt die Bereitstellung und Nutzung der Recheninfrastruktur (Infrastructure-as-a-Service, IaaS). Am wenigsten werden bisher Plattformen zur Entwicklung eigener Dienstleistungen genutzt (Platforms-as-a-Service, PaaS).

Digitale Infrastruktur zur Datenübertragung

Zur Übermittlung der Daten ist ebenfalls eine Infrastruktur nötig, die die erhobenen Daten auf dezentraler Ebene zu den Akteuren transportiert, die diese Daten verarbeiten oder nutzen. Dazu kann

man zwischen verschiedenen Übertragungsmedien (leitungsgebunden oder über Funk) und -entfernungen unterscheiden (Blank-Babazadeh et al. 2021). Zudem lässt sich die Kommunikation im Energiesystem unterscheiden zwischen der Übertragung bis zum Smart Meter und der vom Smart Meter zum Netzbetreiber, Energieversorger oder Energiedienstleister (Gungor et al. 2011). Hinter dem Zähler kommen meist Home, Neighbourhood oder Local Area Networks (HAN, NAN, LAN) zum Einsatz, die leitungsgebunden über die bestehenden Telekommunikationskanäle (Festnetz, Kabelnetz) Daten austauschen. Außerhalb dieser lokalen Zone erfolgt die Übertragung meist über das Wide Area Network (WAN), häufig das bestehende leitungsgebundene Internet. Abbildung 2 zeigt, wie die Kommunikationsinfrastruktur zwischen dem Netzbetreiber und dezentralen Erzeugungsanlagen aussehen kann. Dabei stellt diese Abbildung den physischen Datenweg dar. Bei der Marktorganisation sind noch weitere Akteure wie Messstellenbetreiber und Smart-Meter-Gateway-Administratoren involviert.

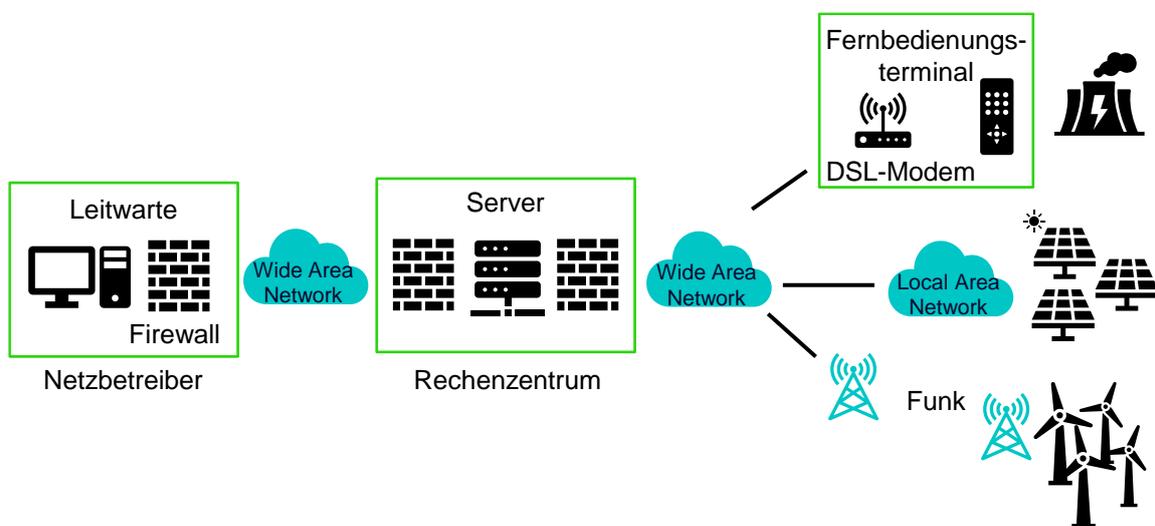


Abbildung 2: Beispiel für die Kommunikationsstruktur zwischen Netzbetreiber und dezentralen Erzeugungsanlagen, eigene Darstellung adaptiert nach Zajc et al. (2019)

Der Mobilfunk ermöglicht die Übertragung von Daten über Funksignale und ist damit nicht leitungsgebunden. Es wird eine Infrastruktur in Form von Funkmasten benötigt, die wiederum über längere Strecken ebenfalls über das Internet verbunden ist (Blank-Babazadeh et al. 2021). Die Übertragung der Daten erfolgt beim Mobilfunk über verschiedene Frequenzbänder oder -bereiche. Diese Frequenzbänder können parallel genutzt werden und werden durch die BNetzA an Telekommunikationsnetzbetreiber zugewiesen. Als kritische Infrastruktur ist für die Energiewirtschaft die Stabilität der Kommunikationsinfrastruktur besonders wichtig. Daher hat die BNetzA im November 2020 entschieden, dass die 450-MHz-Frequenz bevorzugt von der Energiewirtschaft genutzt werden darf (Fleischle et al. 2021). Mit dieser Entscheidung ist der Ausbau der entsprechenden Infrastruktur nötig. Die 540connect GmbH, die im März 2021 den Zuschlag für die Frequenznutzungsrechte bekommen hat, plant bis Ende 2024 flächendeckend 1.600 Funkstandorte in Betrieb zu nehmen (Fleischle et al. 2021).

3.2 Digitale Technologien und ihre Möglichkeiten

Digitale Technologien nutzen die vorhandenen Daten, digitale Technik und Infrastruktur, um Prozesse zu automatisieren und optimieren. Die Bandbreite reicht von eher einfachen Technologien, wie Desktop-Anwendungen für Endnutzer*innen oder automatisierter Kommunikation bis hin zu den aktuellen großen Trends, die sich hinter den Schlagworten Blockchain, Künstliche Intelligenz, Big Data, Plattformen oder Internet of Energy verbergen und im Folgenden vorgestellt werden.

Blockchain-Technologie

Eine Blockchain oder Distributed Ledger Technologie (DLT) ist eine Datenbank, dessen Daten dezentral verteilt gespeichert werden und die eine sichere Transaktion zwischen zwei Parteien ohne eine dritte Autorität (z. B. eine Bank oder Behörde) ermöglicht (z. B. Pilkington 2016). Eine Transaktion kann dabei eine Übertragung von Gütern oder Information sein, die vergütet wird, z. B. ein Stromhandel. Zur Überprüfung, ob eine Transaktion gültig ist, also ob z. B. die Identitäten und die Zahlungsweise stimmen, wird ein Datenblock für die Transaktion erzeugt und dieser wird von mehreren dezentralen Instanzen über kryptografische Verfahren geprüft und dann an eine bestehende Blockchain angehängt und gespeichert. Zur Verifizierung stehen verschiedene sogenannte Konsensus-Mechanismen zur Verfügung, die bekannteste ist die Proof-of-Work-Methode, die auch im Fall von Bitcoins zum Einsatz kommt. Daneben gibt es mittlerweile noch weitere Methoden, die vor allem versuchen ressourcenschonender zu arbeiten. Die Blockchain-Technologie zeichnet sich somit dadurch aus, dass sie fälschungssicher, unabhängig und rückverfolgbar ist.

Ob der Einsatz einer Blockchain für einen Anwendungsfall sinnvoll ist, hängt von mehreren Faktoren ab. Andoni et al (2019) nennen hier zum einen, dass die Assets in Form einer digitalen Datenbank darstellbar sein sollten und zum anderen, dass diese Datenbank zwischen den Parteien getauscht und parallele Berechnungen durchgeführt werden müssen, damit die Transaktionen unabhängig sind. Sinnvoll kann es nach Andoni et al (2019) sein, zu überlegen, warum diese Form der Dezentralisierung in einem bestimmten Fall notwendig oder hilfreich ist. Das können zum Beispiel Kostenreduktionen, schnellere und sichere Transaktionen, die Rückverfolgbarkeit der Transaktionen oder der Wunsch auf den Verzicht einer Autorität sein. Im bekanntesten Fall der Blockchain-Technologie, den Bitcoins, wurde eine Währung mit Transaktionen ohne die Nutzung von Banken realisiert.

Der häufigste Anwendungsfall einer Blockchain im Energiebereich ist aktuell der Handel von Energie zwischen einzelnen Personen (Peer-to-Peer-Trading) (vgl. Andoni et al. 2019; Thasnimol und Rajathy 2020). Daneben finden sich in der Literatur aber noch eine Reihe von weiteren Beispielen im Energiebereich, bei denen Blockchain bereits im Einsatz ist oder ein entsprechendes Potenzial besteht. Andoni et al (2019) konnten in der Literatur folgende Anwendungsfälle identifizieren:

- *Rechnungswesen*: Automatische Rechnungsstellung im Falle von Smart Contracts, Mikrozahlungen für Energie, pay-as-you-go-Lösungen oder Prepaid Zahlungen und Zähler
- *Verkauf und Marketing*: Individualisierte Tarife auf Basis von persönlichen Präferenzen (in Kombination mit künstlicher Intelligenz)
- *Handel und Märkte*: Handelsplattformen, Risikomanagement, Zertifikatehandel

- *Automatisierung*: Steuerung von Micro-Grids, P2P-Handel mit optimierter Erzeugung und Verbrauch
- *Smart Grid Anwendungen und Datentransfer*: Kommunikation zwischen smarten Anwendungen (Smart Meter, Sensoren, Monitoring-Systeme)
- *Netzmanagement*: Flexibilitäts- und Anlagenmanagement
- *Sicherheits- und Identitätsmanagement*: Sicherheit von Transaktionen in den Punkten Privatsphäre, Datenschutz und Identitätsmanagement
- *Gemeinschaftliche Nutzung von Anlagen*: Gemeinschaftliche Ladeinfrastruktur oder gemeinschaftliche Nutzung von Speichern
- *Wettbewerb*: Vereinfachter und schnellerer Energieversorgerwechsel
- *Transparenz*: Erhöhte Transparenz für Audits und regulatorische Verpflichtungen

Bisher gibt es viele Beispiele für Pilot- und Forschungsprojekte mit Blockchain-Anwendungen im Energiebereich und eine Vielzahl an Energieversorgern prüft die Nutzung von Blockchain (vgl. Andoni et al. 2019; BDEW 2017b), allerdings müssen die versprochenen Vorteile der Blockchain, wie die Sicherheit, Geschwindigkeit und Skalierbarkeit noch in der Praxis überprüft werden. Das hat auch Auswirkungen auf die angewendeten Konsensus-Mechanismen für die Blockchain. Ein großer Kritikpunkt war die Effizienz der Technologie. Dem begegnen neuere Umsetzungen häufig mit vereinfachten Beweismethoden wie Proof of Stake (Andoni et al. 2019). Gleichzeitig wird der Technologie aber immer noch ein hohes Potenzial als Lösung des dezentralen Handels zugeschrieben.

Big Data

Der Begriff „Big Data“ deutet daraufhin, dass eine große Menge an Daten zur Verfügung steht, die verarbeitet werden soll. In der wissenschaftlichen Literatur werden darüber hinaus drei charakteristische Merkmale von „Big Data“ genannt: Die große Menge der generierten und zur Verfügung stehenden Daten in einem Datenset, die hohe Geschwindigkeit mit der das Datenset um neue Daten anwächst und die große Vielfalt der Formate in denen Daten vorhanden sind (bspw. Bilder, Text und Videos) (vgl. Rhodes 2020). Wenn Daten in dieser Fülle und Vielfalt vorliegen, sind für die Verarbeitung und Nutzbarmachung neue analytische Methoden notwendig, die über die übliche Datenverarbeitung hinausgehen, um die Daten zu gewinnen, zu typisieren und zu charakterisieren (vgl. Jiang et al. 2016). Im Energiebereich können diese Analysen zum Beispiel bei der Steuerung von Smart Grids relevant sein, wenn Wetterdaten, Netzzustandsdaten, Marktdaten und Daten aus Geoinformationssystemen (GIS) zusammenkommen (vgl. Jiang et al. 2016). Die fortschreitende Digitalisierung erweitert diese Daten noch um die Daten, die über das Smart-Meter-Gateway zur Verfügung gestellt werden. Jiang et al (2016) identifizieren daher vier Felder in denen Big Data zur Anwendung kommt: Anlagenmanagement, Einsatzplanung, Ausfallerkennung/-vermeidung sowie dezentrale Erzeugung und E-Mobilität. Big Data wird häufig mit anderen Analysemethoden kombiniert (z. B. Optimierungsalgorithmen oder künstliche Intelligenz).

Künstliche Intelligenz und maschinelles Lernen

Künstliche Intelligenz (KI) ist kein klar definierter Begriff. Er beschreibt grundsätzlich die Eigenschaft eines IT-Systems, „menschähnliche, intelligente Verhaltensweisen zu zeigen“ (O A 2017,

S. 28). Eine künstliche Intelligenz hat dabei vier Kernfähigkeiten: Wahrnehmen, Verstehen, Handeln und Lernen. Anders als bei anderen IT-Systemen ist das Ziel einer künstlichen Intelligenz, nicht nur Daten zu verarbeiten, sondern zu lernen und zu verstehen (O A 2017). Unterschieden wird häufig zwischen einer starken und einer schwachen KI, wobei die starke KI eine mit dem Menschen vergleichbare Intelligenz bezeichnet und bis heute ein theoretisches Konzept ist. Im Folgenden ist somit immer eine schwache KI gemeint, die nur für einen bestimmten Anwendungsfall trainiert wird. Damit eine KI eigenständig aus neuen Daten Entscheidungen ableiten kann, muss die KI zuerst angelernt werden. Das maschinelle Lernen ist dabei ein Verfahren, um aus großen Datenmengen zu lernen. Dabei wird das System mit einem Testdatensatz trainiert und kann das Wissen anschließend auch auf unbekannte Daten und Situationen anwenden. Der BDEW (2020) unterscheidet zwischen vier Anwendungsfeldern in denen KI in der Energiewirtschaft zum Einsatz kommen kann:

- *Anlagenplanung*: z. B. Optimierung in der Anlagenplanung auf Basis von Prognosen, Bildmaterial, Vermessungen;
- *Instandhaltung, Wartung und Anlagenmanagement*: z. B. effizientere Wartung von Anlagen durch Auswertung von Vorhersagen, Bilddaten, Auslastungsdaten und Personalverfügbarkeit;
- *Netz- und Anlagenbetrieb*: z. B. Optimiertes Einspeisemanagement oder effizienterer Netzbetrieb durch Wetterprognosen und Vorhersagen auf Basis historischer Daten;
- *Vertrieb und Kundenschnittstelle*: z. B. Vorhersage von Verbrauchsmustern oder Auswertungen zur Kund*innenkommunikation.

Ob der Einsatz einer KI sinnvoll ist, lässt sich laut BDEW (2020) anhand von einigen Kernkriterien bewerten. So sollte es für den Einsatzzweck viele messbare Datenpunkte geben, ein hohes Optimierungspotenzial vermutet werden, menschähnliche Fähigkeiten (hören, sehen, sprechen) gefordert sein und der Wunsch nach einem sich selbständig optimierenden System vorhanden sein. Nicht geeignet ist eine KI, wenn geringe Datenmengen vorliegen oder Trainingsdaten verzerrt sein könnten. In den Datenmengen, die eine KI benötigt, liegt jedoch aus Nachhaltigkeitssicht auch immer ein Kritikpunkt. Denn die Verarbeitung und Speicherung von großen Datenmengen benötigt selbst viel Energie (Lange und Santarius 2018).

Internet of Energy

Analog zum Internet of Things (IoT) bezeichnet das Internet of Energy (IoE) die Verknüpfung von Sensorik, Internet und effizienten Algorithmen zur Datenverarbeitung im Energiebereich. Das Ziel oder vielmehr die Vision ist, die Vielzahl von Daten, die z. B. im Haus, Stromnetz oder bei Erzeugungsanlagen erhoben werden, über das Internet zentral zu sammeln, zu verarbeiten und Ergebnisse zurückzugeben, um dann im besten Fall einen effizienten und ressourcenschonenden Betrieb von Anlagen zu ermöglichen. Dabei werden die Daten nur jeweils einmal erhoben und dezentral weiter genutzt. Teilweise wird das IoE daher als Kombination von Smart Grid und IoT bezeichnet (Bui et al. 2012). Relevant für das Funktionieren des IoE bzw. einzelner Anwendungsfälle ist eine gute und verlässliche Kommunikationsinfrastruktur (Rana 2017; Song et al. 2017). Dabei werden Ansätze des IoE aktuell besonders im Kontext von Smart Grids (Jaradat et al. 2015; Kabalci und Kabalci 2019; Nefedov et al. 2018; Strielkowski et al. 2019) oder Energie-Management-Systemen (Hannan et al. 2018) genutzt.

Digitale Plattformen

Digitale Plattformen stellen eine technische Möglichkeit dar, um Produkte, Dienstleistungen oder Technologien anzubieten (Baums 2015). Im Energiebereich kommen meist digitale Plattformmärkte zu Einsatz, d. h. über die technische digitale Struktur der Plattform werden Transaktionen durchgeführt. Im Unterschied zu zwei-seitigen Märkten, in denen eine Angebots- und eine Nachfrageseite vorhanden ist, ermöglichen digitale Plattformen ein Netzwerk an Akteuren mit variierenden Rollen in Angebot und Nachfrage. Bis zum Jahr 2017 haben Duch-Brown und Rossetti (2020) bereits 217 solcher digitaler Energie-Plattformen in der EU identifiziert, wovon 25 in Deutschland verortet waren. Dabei bilden Finanzierungsplattformen für erneuerbare Energien eine große Beispielklasse. Die Relevanz digitaler Plattformen im Energiebereich hängt damit zusammen, dass die dezentrale Struktur besonders gut zum dezentralen Wandel im Energiesystem passt. Borghesi und Glachant (2019) gehen sogar so weit zu sagen, dass die Stromnetze zu einer offenen, digitalen Plattform werden sollten, die alle anderen Initiativen (vor oder hinter dem Zähler) unterstützt. Heinemann et al. (2019) haben zwei Anwendungsfälle näher analysiert, die viel Dezentralität, Regionalisierung und Einbindung vieler Akteure erfordern und daher für die Nutzung digitaler Plattformen interessant sind: Flexibilitätsplattformen und P2P-Handel. Die Flexibilitätsplattformen wären dabei vor allem für das Netzmanagement hilfreich, um die Abregelung von erneuerbaren Energien auch bei erhöhtem Ausbau gering zu halten. Erreicht werden kann dies vor allem durch die erhöhte Reaktionsgeschwindigkeit beim Handel über digitale Plattformen. Beim P2P-Handel können digitale Plattformen zeitlich und örtlich sehr flexible Strombezüge ermöglichen, auch unter Berücksichtigung von Verbraucherinteressen (Heinemann et al. 2019). Positive Effekte hierbei kann auch die Vermarktung von EE-Anlagen sein, die nicht mehr gefördert werden.

Digitaler Zwilling

Das Konzept des digitalen Zwillings wurde erstmals 2003 durch die NASA geprägt und seitdem in unterschiedlichen Kontexten genutzt. Allgemein ist ein digitaler Zwilling eine digitale oder virtuelle Repräsentation eines physikalischen Systems und wie dieses aussieht und sich verhält, mit dem Ziel der Optimierung oder Entscheidung für einen gewissen Zeithorizont (Yu et al. 2022). Die Vorteile eines digitalen Zwillings liegen darin, die Auswirkungen von Szenarien oder neuen physikalischen Assets in einer virtuellen Umgebung zu testen und so entweder eine effizientere Nutzung oder Umsetzung zu realisieren. Yu et al. (2022) haben drei Einsatzbereiche für digitale Zwillinge in der Energiewirtschaft identifiziert:

- *Design*: Virtuelle Tests, Optimierung
- *Prozess*: Optimierung, Vorhersage, Monitoring, Steuerung, Training
- *Service*: Ausfallerkennung und -diagnose.

Da ein digitaler Zwilling eine Methode ist, um physikalische Auswirkungen zu errechnen ohne Eingriffe in der Wirklichkeit vorzunehmen, werden diese sehr häufig in der Forschung eingesetzt, um veränderte Rahmenbedingungen zu implementieren. Das können beispielsweise veränderte klimatische Bedingungen oder ausgebaute Stromnetze sein (Onile et al. 2021). Da der Aufbau eines digitalen Zwillings zunächst mit hohem Aufwand verbunden ist, werden diese in der Praxis häufig in Zusammenhang mit hochinvestiven Maßnahmen eingesetzt (Sleiti et al. 2022). In der Forschung

sind die drei Haupttreiber für den Einsatz eines digitalen Zwillings die Verbesserung der Energieeffizienz oder des Energieverbrauchs, die Dekarbonisierung des untersuchten Systems und die ökonomische Optimierung (Yu et al. 2022).

Beispiele für den Einsatz digitaler Technologien in den Wertschöpfungsketten der Energiewirtschaft

Der Einsatz der hier vorgestellten digitalen Technologien ist vielfältig. In einigen komplexen Fällen kann auch eine Kombination von Technologien sinnvoll sein. Tabelle 1 gibt einen Überblick über typische Anwendungsfälle der digitalen Technologien, aufgeteilt nach den klassischen Wertschöpfungsstufen der Energieversorgung.

Tabelle 1: Beispiele für den Einsatz von digitalen Technologien im Energiesystem, eigene erweiterte Darstellung aufbauend auf Rhodes (2020)

Digitale Technologie	Erzeugung	Handel	Übertragung	Vertrieb / Endkund*innen
Block-chain	Validierung im Emissionszertifikatehandel	Durchführung von Smart Contracts	Transaktionen in Microgrids und lokalen Märkten	Vereinfachung und Automatisierung von Abrechnung und Zählwesen
Big Data	Erhöhung der Prozesseffizienz durch Datenanalyse	Prognose von zukünftiger Last und Preisen	Datenanalyse zur Optimierung von Erzeugung und Speicherung in Communities	Tipps zur Energieeinsparung
KI & maschinelles Lernen	Optimierung von Windparks durch Windprognosen	Energiehandel von autonomen Agenten	Schutz von Netzen gegen Stromausfälle	Automatisierung von Lastverschiebungen
Internet of Energy	Drohneninspektion von technischem Equipment	Smart Grid Sensorik, Monitoring und Anlagenmgmt	Lokale Microgrids durch integrierte Steuerung	Vernetzung von E-Autos, Hausautomatisierung
Digitale Plattformen	Crowdfunding in erneuerbare Energien	Peer-to-Peer-Handel	Umsetzung von Flexibilitätsmärkten	Individualisierter Versorgerwechsel
Digitaler Zwilling	Anlagenplanung unter Unsicherheiten	Virtuelle Kraftwerke	Langfristige Netzplanungsstrategie	Analyse von Energieeffizienzmethoden in Gebäuden

3.3 Chancen und Herausforderungen beim Einsatz digitaler Technik und Technologien

Beim Einsatz digitaler Technik und Technologien stellen sich eine Reihe von offenen Fragen bzgl. ihrer nachhaltigen Wirkung. In vielen Bereichen ist der Einsatz noch in der Phase der Forschung und Entwicklung und der Umsetzung von Pilotprojekten (z. B. Alizadeh et al. 2016; Castagneto Gisse et al. 2019; Kasaei et al. 2017; Kondziella und Bruckner 2016; Schuitema et al. 2017), daher sind allgemeine Aussagen noch schwierig. Vereinzelt wurden bereits Erkenntnisse zur sozial-ökologischen Wirkung der digitalen Transformation oder einzelner Bereiche erzielt (z. B. Mlinarič et al. 2019; Strohmeyer und Reetz 2019; Tagliapietra et al. 2019; Varela 2018). Im Folgenden werden besonders relevante Chancen und Herausforderungen aus Nachhaltigkeitssicht weiter beleuchtet.

Infrastruktur, Daten und Resilienz

Für eine funktionierende Digitalisierung müssen eine stabile Infrastruktur und zuverlässige Daten zur Verfügung stehen. Aktuell ist die Datenverfügbarkeit und Datenqualität nicht immer gewährleistet (z. B. O'Dwyer et al. 2019). Dazu kommt, dass der Zugang zu Daten zum Teil erschwert ist, bzw. eine Abwägung zwischen Datenschutz und Open Data getroffen werden muss (BDEW 2020). Es gibt jedoch eine Reihe von Initiativen, wie die Open Energy Platform (OEP Community 2022), die sich für Open Data im Energiebereich einsetzen, um eine effiziente Nutzung der Daten und mehrfache Erhebung von Daten zu vermeiden. Der Datenschutz ist in Deutschland grundsätzlich eher streng geregelt, jedoch können mit Zustimmung der Nutzer*innen auch Daten für nahezu beliebige Zwecke genutzt werden. Lucha und Meinecke (2019) gehen davon aus, dass sich Verbraucher*innen mit einem hohen Datenschutzbewusstsein nicht gegen diejenigen durchsetzen, die den Komfort durch digitale Technologien schätzen und somit Angebote mit eher geringen Datenschutzstandards und höherem Mehrwert für die Kund*innen der Normalfall werden.

Sowohl bei den Daten als auch bei den Kommunikationsschnittstellen fehlen teilweise noch Standards, die eine reibungsfreie Interoperabilität gewährleisten und Monopolstellungen einzelner Anbieter verhindern (Richard und Vogel 2017). Der Ausbau der IKT ist zugleich auch ein Risiko für die Verwundbarkeit der kritischen Infrastruktur. Hier gibt es nach Blank-Babazadeh et al. (2021) noch eine Reihe von Risiken. So wird angemerkt, dass bei der Vielzahl an Anlagen, die gesteuert werden, ein simultanes Verhalten entstehen kann, das systemrelevant werden kann. Andererseits kann eine dezentrale Struktur auch zu mehr Resilienz führen, wenn diese dezentralen Systeme auch autark im Inselbetrieb funktionieren oder sogar in Kombination mit anderen kritischen Infrastrukturen wie Krankenhäuser und Polizeistationen. Um diese stabilisierende Wirkung zu nutzen, muss laut Blank-Babazadeh et al. (2021) jedoch ein Fernzugriff bzw. eine Beeinflussung der Anlagen durch die Netzbetreiber möglich sein. Auch hier sind Standards und Schnittstellen oder Plattformen für eine gute Interoperabilität nötig. Perspektivisch könnten dann auch digitale Technologien wie KI zum Einsatz kommen, um in unerwarteten Situationen die Anlagen stabil zu steuern.

Hinzu kommt, dass durch die starke Vernetzung in einem digitalen Energiesystem auch Fehler und Angriffe große Auswirkungen auf einen störungsfreien Betrieb haben ohne längere kritische Ausfälle (Blank-Babazadeh et al. 2021). Die Amplitude der Auswirkungen wird insbesondere auch dadurch erhöht, dass fehlerhafte IKT, wenn sie für den Betrieb des Stromsystems eingesetzt wird,

nicht einfach abgeschaltet werden kann, da sonst kurzfristig das Stromnetz droht zusammenzubrechen. Ebenso kann die Verknüpfung von IKT-System und Stromsystem die Systemkomplexität und Vorhersehbarkeit und damit auch die Komplexität von auftretenden Fehlern erhöhen (Blank-Babazadeh et al. 2021).

Energie- und Ressourcenverbrauch vs. Effizienzgewinne

Einer der großen Ziele beim Einsatz der Digitalisierung ist eine bessere Effizienz zu erzielen. Das kann mehrere Bereiche betreffen, wie die effizientere Nutzung von Erzeugungsanlagen für Wärme und Strom (Gähns et al. 2021b), die bessere Steuerung dezentraler EE-Anlagen (Heinemann et al. 2019) oder die effizientere Nutzung vorhandener Infrastruktur bei gleichzeitigem Ausbau von erneuerbaren Energien (Lucha und Meinecke 2019). Daneben werden vor allem auch ökologische Wirkungen auf Energiesystemebene angestrebt, wie weniger Abregelung von erneuerbaren Energien oder die Vermeidung des Abrufs konventioneller Reserveleistungen (Heinemann et al. 2019). Diesem Ziel der Einsparungen, steht andererseits ein teilweise hoher Energie- und Ressourcenverbrauch gegenüber. Das betrifft vor allem den hohen Energieverbrauch bei komplexen digitalen Technologien wie Blockchain, künstlicher Intelligenz oder Internet of Energy (Lucha und Meinecke 2019; Motlagh et al. 2020). Daneben ist aber auch der Einsatz der Ressourcen und tlw. eingesetzten Rohstoffe für die zusätzliche digitale Infrastruktur einzubeziehen. Zusätzlich können positive oder negative benutzerinduzierte Effekte hinzukommen. Ein Beispiel sind Rebound-Effekte, die zu einem Mehrverbrauch führen und damit die Einsparungen nivellieren oder diese sogar übersteigen (Gähns et al. 2021b; Lucha und Meinecke 2019).

Höhere Investitionen und geringere Kosten

Die höhere Effizienz in der digitalen technischen Umsetzung geht in den meisten Fällen mit geringeren laufenden Kosten einher. Allerdings sind sowohl für die digitale Infrastruktur als auch den Aufbau und die Anpassung der digitalen Technologien teilweise hohe Anfangsinvestitionen notwendig (Richard und Vogel 2017). Gerade die digitalen Technologien lassen sich jedoch meist ohne größeren Aufwand auf andere Gebiete übertragen oder erweitern. Dadurch können die Methoden auch ohne größere Kosten auf kleinere Probleme übertragen werden und z. B. Effizienzpotenziale erschlossen werden, die sich sonst ökonomisch nicht einzeln rechnen würden (Richard und Vogel 2017). Wobei laut BDEW (2020) für Optimierungen im Stromnetzmanagement, die häufig das Ziel beim Einsatz digitaler Technologien sind, aktuell wenig ökonomische Anreize aufgrund der Regulierung bestehen.

Partizipation, Transparenz und soziale Auswirkungen

Der Einsatz digitaler Technologien kann nicht nur technisch die Dezentralität durch die Einbindung von verteilten erneuerbaren Energien erhöhen, sondern auch die Möglichkeiten für Mitbestimmung und Partizipation erhöhen (O'Dwyer et al. 2019) (vgl. hierzu auch Kapitel 5). So können dezentrale Akteure sowohl in Smart Grids (Lucha und Meinecke 2019) als auch in neuen Energiemärkten (Heinemann et al. 2019) vermehrt teilnehmen und dort die Vielfalt erhöhen. Auch kann die Digitalisierung in manchen Bereichen zu mehr Transparenz führen, bspw. bei der Stromherkunft auf digitalen Marktplätzen (Heinemann et al. 2019).

Auf der anderen Seite können erhöhte Kosten durch einzelne Elemente, wie beim Einbau von Smart Metern, auch bei Verbraucher*innen landen, ohne dass diese von den Effizienzgewinnen

profitieren (Gährs et al. 2021a). Zudem führt die Digitalisierung nicht immer zu mehr Transparenz, sondern kann im Gegenteil zur Intransparenz von Prozessen führen, wenn die Technologien zu komplex sind (BDEW et al. 2021). Die Komplexität beim Einsatz der Digitalisierung kann auch in einer Überforderung der Mitarbeiter*innen münden (BDEW et al. 2021), insb. bei kleineren Energieversorgern, die kein auf die Digitalisierung spezialisiertes Personal haben. Daneben gibt es teilweise ethische Bedenken beim Einsatz von Künstlicher Intelligenz, wie ein vollständiger Ersatz von Arbeitsplätzen, denen begegnet werden muss um eine Akzeptanz zu gewährleisten (BDEW 2020).

4 Digitale Geschäftsmodelle und digitale Energiegemeinschaften

4.1 Auswirkungen der Digitalisierung auf Geschäftsmodelle in der Energiewirtschaft

Geschäftsmodelle beschreiben das Prinzip, wie eine Organisation Nutzen bzw. Werte schafft und bereitstellt sowie darauf aufbauend Einkommen generiert (Osterwalder und Pigneur 2010). Nach Schallmo (2018) sind Geschäftsmodelle „die Grundlogik eines Unternehmens, die beschreibt, welcher Nutzen auf welche Weise für Kunden und Partner gestiftet wird“.

Bei der Beschreibung und Ausgestaltung von Geschäftsmodellen spielen nach Clauß (2017) drei Dimensionen eine zentrale Rolle: Wertangebot, Wertsicherung und Wertschöpfung einer Unternehmung. Eine Einteilung in fünf Dimensionen nimmt Schallmo (2018) vor: Kunden-, Nutzen-, Wertschöpfungs-, Partner- und Finanzdimension. Auf diese Systematiken wird in den folgenden Abschnitten zurückgegriffen, um die Auswirkungen der Digitalisierung auch Geschäftsmodellen in der Energiewirtschaft einzuordnen.

Durch Schlüsselrends (Veränderungen in den Bereichen Technologien, Regulatorik, sozio-kulturelle und sozio-ökonomische Veränderungen) und weitere Treiber in den Dimensionen der Marktkräfte, der makroökonomischen Kräfte sowie der Branchenkräfte verändern sich Geschäftsmodelle (Osterwalder und Pigneur 2011). So auch in der Energiewirtschaft.

In der prä-liberalisierten Energiewirtschaft war das vorherrschende Geschäftsmodell das vertikal integrierte Energieversorgungsunternehmen, das die Bereiche Erzeugung, Netz sowie Vertrieb und Handel in einem Monopol in einem Versorgungsgebiet umfasste (Doleski 2017). Ab 1996 leitete die EU die Liberalisierung der Energiemärkte und damit die Entflechtung der genannten Bereiche ein, wodurch die Elektrizitäts- und Gasmärkte für den Wettbewerb freigegeben wurden (Konstantin 2013). Bis ca. 2012 zeichnete sich dieser vor allem durch einen Preiswettbewerb unter den etablierten und neuen Versorgern aus. Das Geschäftsmodell der etablierten Energieversorgungsunternehmen blieb aber in wesentlichen Punkten erhalten: Fokus auf kostengünstige und fossile Energiebereitstellung, hohe Marktanteile und Nutzung von Größenvorteilen („Economies of Scale“) (Doleski 2017; Wagner et al. 2020). In den Folgejahren nahm in den Versorgungsunternehmen v. a. die Serviceorientierung gegenüber den Kund*innen zu. Seit 2015 wird diese Entwicklung zusätzlich durch die fortschreitende Digitalisierung untermauert (Doleski 2017).

Aus den globalen Umbrüchen der Dekarbonisierung, Dezentralisierung, Demokratisierung und Digitalisierung ergeben sich – auch in der Energiewirtschaft – Notwendigkeiten und Möglichkeiten für neue Dienstleistungen und somit auch die Chance zur Entwicklung neuer Geschäftsmodelle (Giehl et al. 2020; Löbbe und Hackbarth 2017; Wagner et al. 2020), was über eine einfache Anpassung bestehender Modelle hinausgeht (Specht und Madlener 2019). In diesem Zusammenhang kann nach Veit et al. (2014) von digitalen Geschäftsmodellen gesprochen werden, „wenn Veränderungen digitaler Technologien mit fundamentalen Auswirkungen auf die Durchführung des Geschäftsbetriebs sowie auf die generierten Einnahmen eines Unternehmens einhergehen“. Die Digitalisierung bzw. Informationstechnologien sind in diesem Zusammenhang integraler Bestandteil der Wertschöpfungsdimension oder sogar Enabler des Geschäftsmodells (Boston College et al. 2014; Clauß und Laudien 2017). Darüber hinaus zeichnen sich digitalisierungsbasierte Geschäftsmodelle nach Loock (2020) durch drei Eigenschaften aus: ein starker Fokus auf die Beziehungen zwischen den Unternehmen und seinen Stakeholdern, das Verfolgen von Ansätzen mit möglichst wenig Eigentum an Assets (Asset-light-Strategie) und eine hohe Skalierbarkeit.

Welche neuen Ausgestaltungsoptionen durch die Digitalisierung für Geschäftsmodelle im Allgemeinen entstehen können und welche Beispiele in der Energiewirtschaft beobachtbar sind, zeigt die adaptierte Tabelle 2 nach Clauß und Laudien (2017). So ergeben sich in der Wertschöpfungs-, Wertangebots- und Wertsicherungsdimension Veränderungen, die wiederum in drei Wirkebenen der Digitalisierung eingeteilt werden können:

- Interner Fokus: betrifft Prozesse, die innerhalb des Unternehmens digitalisiert oder digital unterstützt werden,
- Externer Fokus: umfasst digitale Verflechtungen mit Kund*innen und Partner*innen,
- Ergebnisfokus: bezieht sich auf Produkte und Dienstleistungen, die für Kund*innen bereitgestellt werden.

Tabelle 2: Systematisierung von Gestaltungsoptionen digitaler Geschäftsmodelle adaptiert nach Clauß und Laudien (2017)

		Dimensionen der Digitalisierung		
		Interner Fokus	Externer Fokus	Ergebnisfokus
Dimensionen des Geschäftsmodells	Wertschöpfung	<ul style="list-style-type: none"> – Effizienzsteigerung durch Digitalisierung von internen Abläufen – Verbesserte Vernetzung von Unternehmensteilbereichen <p><u>Beispiele:</u></p> <ul style="list-style-type: none"> – Einsatz von Enterprise Resource Planning Systemen bei Versorgern 	<ul style="list-style-type: none"> – Erweiterung des Leistungsangebots durch Integration externer Partner*innen in die Leistungserstellung – Verzicht auf die Nutzung physischer Assets <p><u>Beispiele:</u></p> <ul style="list-style-type: none"> – Aggregatoren-Rolle zum Pooling von dezentralen Energietechnologien 	<ul style="list-style-type: none"> – Automatisierung der Leistungserstellung – Zugriff auf Kund*innen-daten zeigt Spielräume in der Leistungsgestaltung auf <p><u>Beispiele:</u></p> <ul style="list-style-type: none"> – Erfassung und Verarbeitung von hochauflösten Einspeise- und Verbrauchsdaten durch Smart Meter und Smart Meter Gateways
	Wertangebot	<ul style="list-style-type: none"> – Höhere Transparenz und Beeinflussbarkeit der Leistungserstellung – Möglichkeit zur Individualisierung des Wertangebots <p><u>Beispiele:</u></p> <ul style="list-style-type: none"> – Angebot von verschiedenen Tarifanwendungsfällen durch Einsatz von Smart Metern 	<ul style="list-style-type: none"> – Gemeinsames Wertangebot verschiedener Anbieter über Plattformen – Erschließung neuer Partner*innen und Märkte durch ein Angebot anbindungsfähiger Prozesse <p><u>Beispiele:</u></p> <ul style="list-style-type: none"> – Tarif-Vergleichsportale – Angebot von E-Auto-Abo bei grünen Stromtarifen (Cross-Selling) 	<ul style="list-style-type: none"> – Entwicklung von Produkt-Service-Systemen – Schaffung digitaler Angebote <p><u>Beispiele:</u></p> <ul style="list-style-type: none"> – Datenvisualisierung und -analyse zu Energieverbräuchen und Einspeisung über Kundenportale von Technologieanbietern
	Wertsicherung	<ul style="list-style-type: none"> – Kostensenkungen durch Prozessautomatisierung und Standardisierung – Digitalisierung der Bezahlung <p><u>Beispiele:</u></p> <ul style="list-style-type: none"> – Blockchain und Smart Contracts zur Abwicklung von Verträgen und Zahlungen in Peer-to-Peer-Energiehandel 	<ul style="list-style-type: none"> – Indirekte Quersubventionen über Dritte – Zwei- und mehrdimensionale Plattformgeschäftsmodelle <p><u>Beispiele:</u></p> <ul style="list-style-type: none"> – Crowdfunding <p><u>Beispiele:</u></p> <ul style="list-style-type: none"> – Verkauf von Stromspeichern und anschließendes Pooling für Energiesystemdienstleistungen 	<ul style="list-style-type: none"> – Software as a Service – Freemiumgeschäftsmodelle <p><u>Beispiele:</u></p> <ul style="list-style-type: none"> – Internet-of-Things-Plattformen für energieverbrauchende Endgeräte als gebührenpflichtige Dienstleistung

Welche Geschäftsmodelle sich durch diese Potenziale im Energiebereich ergeben, diskutieren Giehl et al. (2020). Mit dem Ziel der Vollerhebung stellen die Autor*innen sowohl die bestehenden als auch die sich aus den Trends und strukturellen Umbrüchen ergebenden neuen Geschäftsmodelle der Energiewirtschaft in sogenannten Klassen dar. Die Systematik orientiert sich entlang der Dimensionen „Letztverbrauchernähe“ und der Nähe zu den „Kernaktivitäten“ der klassischen Wertschöpfungskette der Energiewirtschaft (siehe Abbildung 3).

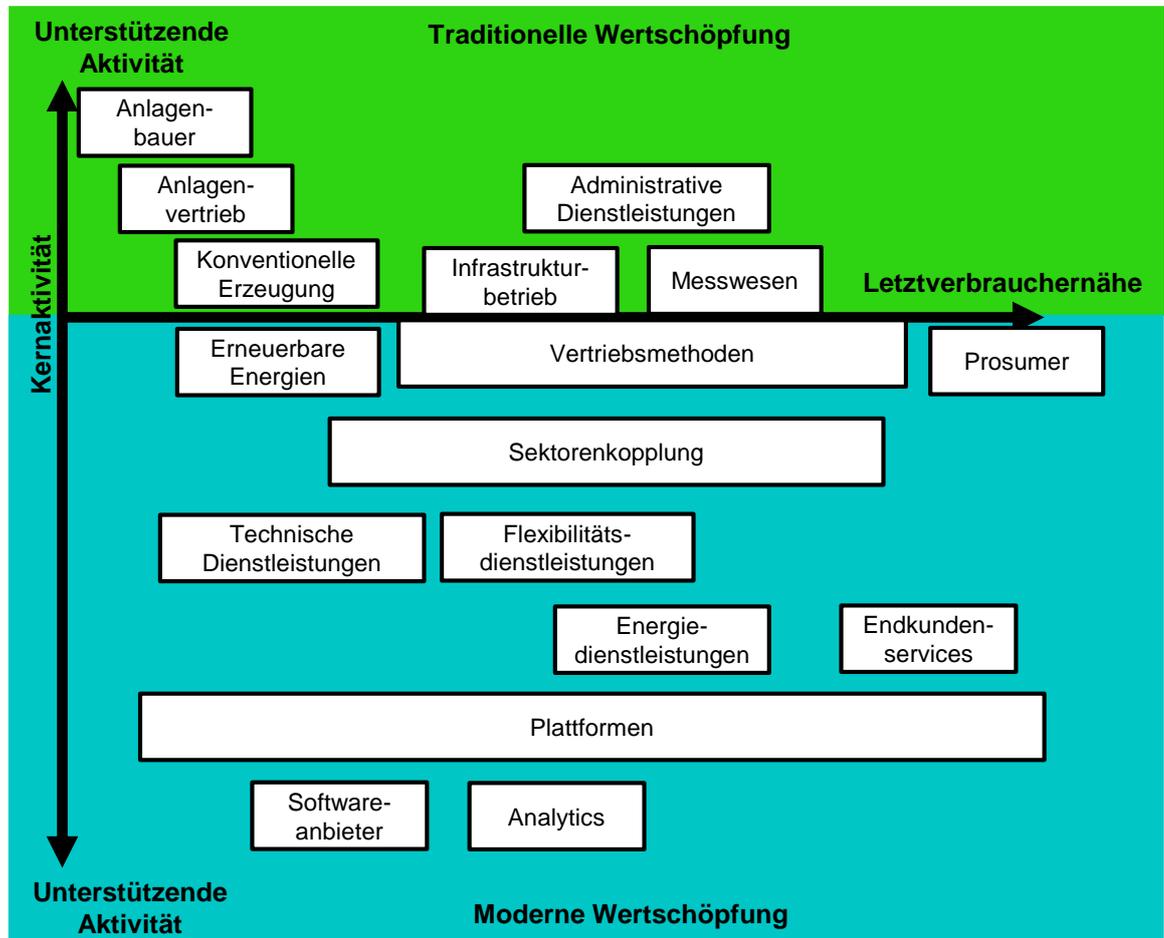


Abbildung 3: Übersicht zu Geschäftsmodellklassen der Energiewende, eigene Darstellung nach Giehl et al. (2019b)

Giehl et al. (2020) betonen, dass einerseits alle Geschäftsmodelle der Energiewirtschaft durch die Digitalisierung betroffen sind, die letztlich auch als Antreiber und Ermöglicher der Energiewende gesehen wird. Andererseits schaffe die Digitalisierung die eigene, neue Geschäftsmodellklasse der „Plattformen“, welche sich durch die Vernetzung von Personen und Unternehmen, den Einsatz von Software und Datenplattformen und die Integration dezentraler Mess- und Steuertechnik sowie künstlicher Intelligenz auszeichnen (Giehl et al. 2019a; Giehl et al. 2019b).

4.2 Formen digitaler Energiegemeinschaften

Die Trends der Dekarbonisierung, insbesondere in Verbindung mit der Verbreitung erneuerbarer Energien, der Dezentralisierung und der Demokratisierung, haben auch zum Aufkommen des Konzeptes der Energiegemeinschaften beigetragen, das in der Praxis bereits (teilweise unter anderen Bezeichnungen) breit umgesetzt wird und in der Wissenschaft Gegenstand der Weiterentwicklung und Verbesserung ist. Energiegemeinschaften können nach Blasch et al. (2021) als eine Art nachhaltiges Geschäftsmodell aufgefasst werden, das für die beteiligten Akteure soziale, wirtschaftliche und ökologische Vorteile mit sich bringt.

Für das Konzept der Energiegemeinschaften existiert eine Reihe von Definitionen (Blasch et al. 2021; Gui und MacGill 2018; Moroni et al. 2019a). Moroni et al. (2019a) schlagen z. B. folgendes, allgemeines Begriffsverständnis vor: Es handelt sich um Gruppen von Individuen, die sich freiwillig auf bestimmte Regeln zur Erreichung gemeinsamer Ziele einigen, die (ausschließlich oder auch) mit Energie in Verbindung stehen, d. h.: Einkauf von Energie als kollektive Gruppen und/oder das Management von Energienachfrage und -versorgung und/oder die Erzeugung von Energie.

Mit der Verabschiedung des EU-Winterpakets „Saubere Energie für alle Europäer“ fand das Konzept auch Einzug in die europäische Gesetzgebung unter den Stichworten der „gemeinsam handelnden Eigenversorger“, der „Erneuerbare-Energien-Gemeinschaften“ und der „Bürgerenergiegemeinschaften“, die sich u. a. durch Anforderungen an den Zweck, die Art der beteiligten Akteure, ihre räumliche Verteilung und den Aktivitätenbereich unterscheiden. Letzterer ist im Fall der Bürgerenergiegemeinschaften weit gefasst: „Erzeugung, einschließlich aus erneuerbaren Quellen, Verteilung, Versorgung, Verbrauch, Aggregation, Energiespeicherung, Energieeffizienzdienstleistungen oder Ladedienstleistungen für Elektrofahrzeuge [...] oder andere Energiedienstleistungen“ (EU 2019). Gemäß den Bestimmungen des Winterpakets waren entsprechende Konzepte für Energiegemeinschaften in den Ländern der Europäischen Union bis zum 31. Dezember 2020 (Elektrizitätsbinnenmarkttrichtlinie) bzw. 30. Juni 2021 (Erneuerbare-Energien-Richtlinie) umzusetzen.

Mit dem Einsatz von Informations- und Kommunikationstechnologie (IKT) und digitaler Mess- und Steuerungstechnik können Personen und Unternehmen vernetzt werden und Gemeinschaftsmodelle zusätzliche Flexibilitätspotenziale heben. Somit können wichtige Energiedienstleistungen für die Energiewende bereitgestellt werden (Mlinarič et al. 2019; Zhou et al. 2020), die benötigt werden, um den steigenden Anteil an dezentralen und volatilen erneuerbaren Energien zu integrieren (Witte et al. 2020). Ein wesentlicher Faktor ist, dass zwischen dem Koordinator einer solchen Gemeinschaft und seinen Mitgliedern die Möglichkeit zur bidirektionalen Kommunikation und zur automatisierten Messung, Steuerung und Regelung besteht, um auf Signale von außen (z. B. Preissignale oder direkte Steuerungssignale) automatisiert reagieren zu können (vgl. Giehl et al. 2019a). Damit ergeben sich neue Möglichkeiten Energiedienstleistungen bereitzustellen und zu teilen, die bislang zentralen Akteuren aufgrund bestimmter Voraussetzungen (z. B. an Mindestgrößen, Reaktionsgeschwindigkeiten oder Kommunikationskanälen) vorbehalten waren (Loock 2020). Energiegemeinschaften, bei denen digitale Technologien in dieser Weise zum Einsatz kommen, bezeichnen wir als „digitale Energiegemeinschaften“ und verstehen sie als eine Teilmenge von Energiegemeinschaften im Allgemeinen.

Da Energiegemeinschaften unter Einsatz digitaler Technologien fundamental neue Ansätze zur Umsetzung etablierter energiewirtschaftlicher Prozesse darstellen, sind sie nach Loock (2020)

nicht als inkrementelle, sondern als transformative Geschäftsmodellinnovationen aufzufassen, die sowohl die Unabhängigkeit einzelner Akteure von diesen Prozessen (z. B. durch die Eigenversorgung mit Energie) als auch die Integration in die bestehenden Märkte zur Bewältigung systemweiter Herausforderungen (z. B. Integration von erneuerbaren Energien durch die Bereitstellung von Flexibilität) ermöglichen. Diese Modelle nutzen die Digitalisierung also, um neue Märkte, Rollen und Dienstleistungen zu entwickeln, und haben das Potenzial bestehende Geschäftsmodelle in der Energiewirtschaft zu überholen und sogar zu ersetzen (vgl. Looock 2020).

In der wissenschaftlichen Literatur werden verschiedene Modelle diskutiert, die bei Einsatz bidirektionaler IKT und MSR-Technik als digitale Energiegemeinschaften verstanden werden können. Eine Umsetzung der Modelle in der Praxis ist in den vergangenen rund zehn Jahren in Form von Pilotprojekten, aber auch wirtschaftlichen Umsetzungen, zu beobachten gewesen. Vier Konzepte und entsprechende Praxisbeispiele mit technischer Implementierung von digitalen, bidirektionalen Elementen werden im Folgenden vorgestellt. Die vier vorgestellten Typen von Energiegemeinschaften sind in der Praxis, wie die dazugehörigen Beispiele zeigen, häufig nicht überschneidungsfrei¹.

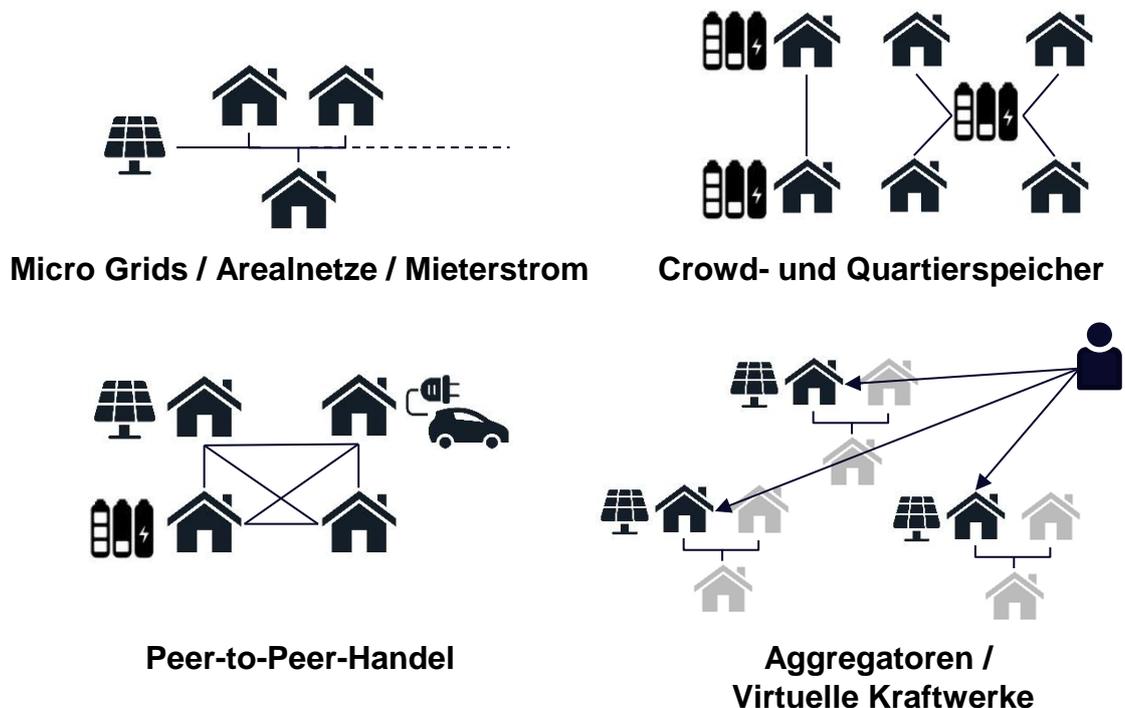


Abbildung 4: Formen von digitalen Energiegemeinschaften, eigene Darstellung

Lokale Versorgung mit erneuerbaren Energien; Microgrids

An dem Konzept der lokalen Versorgung mit erneuerbaren Energien können z. B. lokale Wärmenetze, einzelne PV- oder Batteriebesitzer oder auch Blockheizkraftwerke beteiligt sein, die häufig über private Netzinfrastrukturen miteinander verbunden sind. Eine bekannte Form sind lokale Microgrids (früher mitunter als Areal- und Objektnetze bezeichnet), die in sich geschlossen oder ans öffentliche Stromnetz angeschlossen sein können (Gui und MacGill 2018; Mlinarič et al. 2019).

¹ So können z. B. in Microgrids, Speicherkonzepten und in Peer-to-Peer-Plattformen ebenfalls Aggregatoren auftreten oder lokal ausgerichtete Konzepte mit einer dezentralen Handelsplattform organisiert werden.

Ein Praxisbeispiel aus dem gewerblichen Kontext ist das Microgrid auf dem Firmenareal von Siemens in Wien. Durch Verknüpfung verschiedener Erzeugungs- und Verbrauchseinheiten werden Strom- und Wärmebereitstellung optimiert. Eingebunden sind eine 312 kWp Photovoltaikanlage, ein 500 kWh Batteriespeicher, ein Gebäude- und Energiemanagementsystem sowie die Möglichkeit zur Laststeuerung und optimierten Ladung von E-Autos. Für die Kommunikation zwischen den technischen Einheiten ist ein privates 5G-Mobilfunknetz im Einsatz. Das Microgrid ist ans öffentliche Stromnetz angeschlossen. Somit gibt es die Möglichkeit Systemdienstleistungen wie Regelenergie bereitzustellen (Siemens 2020).

Ein Projekt zur Einbindung von privaten Verbraucher*innen ist das „Smarte Quartier Durlach“ in Karlsruhe. Fünf Mehrfamilien-Bestandsgebäude mit insgesamt 175 Wohneinheiten werden mit zwei Wärmepumpen und fünf PV-Anlagen (insgesamt 193 kWp) in einem Arealnetz sowie mit zwei BHKWs (insgesamt 100 kW) und einer Nahwärmeleitung ausgerüstet, um die Bewohner*innen mit Strom und Wärme zu versorgen. Ein intelligentes Energiemanagementsystem optimiert den Eigenverbrauch und die Wirtschaftlichkeit der Anlagen. Hierfür werden die Fahrpläne von Wärmepumpen und BHKWs mithilfe von künstlicher Intelligenz und unter Berücksichtigung von Verbräuchen, Wetterprognosen, Speicherzuständen und der aktuellen PV-Leistung angepasst (Fraunhofer ISE 2020; Lämmle 2020).

Weitere Microgrid-Konzepte sind z. B. das Projekt „Mobility2Grid“, das mithilfe von E-Mobilen auf dem EUREF-Campus in Berlin umgesetzt wird. Eine Kombination aus Microgrid und Peer-to-Peer-Handel für 20 Haushalte ist das „Landau Microgrid Project“ (LAMP). Weitere Beispiele für smarte Quartiere sind das „Synergie Quartier“ in Walldorf oder das Vorhaben „Smart East“ in der Karlsruher Oststadt.

Crowd- und Quartierspeicher

Elektrofahrzeuge, größere Batteriespeicher sowie dezentrale Speicher können gemeinschaftlich im Konzept der Crowd- und Quartierspeicher genutzt werden. Dabei kann es sich um eine Ansammlung von Batterien in individuellem Besitz oder um einzelne größere Batterien in gemeinschaftlichem Besitz handeln. Damit können verschiedene Typen von Flexibilitätsdienstleistungen erbracht werden, z. B. für die allgemeine Energieversorgung, zur Integration erneuerbarer Energien, zur Erbringung von Systemdienstleistungen, zur Vermeidung von Übertragungsnetz- und Verteilnetzausbau sowie für das Energiemanagement der Kund*innen (Giehl et al. 2019a; Mlinarič et al. 2019; Schnabel 2020).

Ein Praxisbeispiel ist das Neubaugebiet „Am Umstädter Bruch“. Hier hat der Energieversorger Entega einen Batteriespeicher mit einer Kapazität von 274 kWh installiert, auf den 25 Haushalte in der Siedlung, die mit PV-Anlagen (mind. 5 kWp) und teilweise mit Wärmepumpen ausgestattet sind, zugreifen können. Die Teilnehmenden schließen hierfür einen Tarif zur Kapazitätsmiete mit dem Versorger ab und können PV-Überschüsse für 24 Stunden zwischenspeichern. Notwendige Informationen über die Stromverbräuche der Haushalte werden alle 15 Minuten mithilfe von Smart Metern erfasst. Mit der Lösung erreichen die Haushalte einen Grad der Selbstversorgung von bis zu 70 Prozent ohne selbst in einen Speicher investieren oder technische Risiken übernehmen zu müssen. Nicht gebuchte Speicherkapazitäten vermarktet der Energieversorger anderweitig regional und überregional. Mit dem Quartierspeichermodell sollen die Verteilnetzstrukturen entlastet werden (Entega Plus 2020; IÖW 2022; Petermann 2020). Ähnliche Konzepte wurden mit der

„Strombank“ der MVV Energie oder in dem Quartier „Energy Supply Cooperative Franklin“ in Mannheim umgesetzt.

Eine Kombination aus zentralem Speicher (750 kWh) und mehreren dezentralen PV-Batteriespeichern erprobt der Verteilnetzbetreiber Avacon Netz in der Gemeinde Abbenhausen in Twistingen. Wärmepumpen und Nachtspeicherheizungen sind ebenfalls in das technische Konzept eingebunden. Ziel des Projektes ist es, mehrere Use Cases für die Energiegemeinschaft in dem Versorgungsgebiet zu testen und den Nutzen für das Verteilnetz zu ermitteln. Hierzu gehört erstens der Inselnetzbetrieb, bei dem überschüssiger Strom innerhalb der Energiegemeinschaft zwischengespeichert wird, zweitens die Bereitstellung von Leistung für das vorgelagerte Netz, um das Verbundnetz mit den technischen Einheiten zu stabilisieren, und drittens die sogenannte paketbasierte Energiebelieferung, bei der verbleibende Energiebedarfe der Gemeinschaft prognostiziert und die Belieferung entlang einer Versorgungsleitung mithilfe von Wetterprognosen geplant wird. Für die Umsetzung wird ein Energiemanagementsystem eingesetzt, das die flexiblen Verbraucher*innen und Erzeuger*innen in einer aktiven Stromnetzführung durch den Verteilnetzbetreiber berücksichtigt (Avacon Netz 2022; Glennung et al. 2020; Schmidt 2021).

Weitere überregionale Beispiele für Crowd-Speicher sind die Geschäftsmodelle von Sonnen und Lichtblick, die im Abschnitt zu Aggregatoren und virtuellen Kraftwerken vorgestellt werden.

Peer-to-Peer-Energiehandel

Das Konzept des Peer-to-Peer-Handels beschreibt laut Erneuerbare-Energien-Richtlinie II der EU (RED II) „den Verkauf erneuerbarer Energie zwischen Marktteilnehmern auf Grundlage eines Vertrags mit vorab festgelegten Bedingungen für die automatische Abwicklung und Abrechnung der Transaktion, die entweder direkt zwischen den Beteiligten oder auf indirektem Wege über einen zertifizierten dritten Marktteilnehmer, beispielsweise einen Aggregator, erfolgt“ (EU 2018). Grundlage hierfür ist eine Online-Softwareplattform, die Kund*innen und Lieferanten zusammenbringt. Dies kann mit oder ohne Beteiligung von Aggregatoren realisiert werden (Gui und MacGill 2018; Mlinarič et al. 2019; Zhou et al. 2020).

Im Wiener Quartier „Viertel Zwei“ und dem dazugehörigen Forschungsprojekt konnten 100 Bewohner*innen Strom aus einer 100 kWp PV-Aufdachanlage untereinander handeln, um diesen effektiver vor Ort zu nutzen oder an der Börse zu verkaufen. Zur Verfügung stand den Teilnehmer*innen je eine Leistung von 1 kWp und der entsprechende Stromertrag. Weiterhin wurden E-Ladestellen und ein 70 kWh Batteriespeicher in das Konzept integriert. Die Bedingungen für Bezug und Verkauf des Stroms konnten die Mitglieder der Energiegemeinschaft per App auf einer Plattform selbst festlegen sowie zwischen verschiedenen dynamischen oder statischen Stromtarifen wählen. Um den Handel unter den Akteuren zu ermöglichen, kam eine Blockchain zum Einsatz. Damit wurden die Transaktionen und Abrechnungen sowie die Rückverfolgung und die Identifikation realisiert (Christof 2021; Wien Energie 2022).

Einen größeren geografischen Fokus hat die Peer-to-Peer-Plattform „Tal.Markt“ der Wuppertaler Stadtwerke. Zunächst regional und mittlerweile auch deutschlandweit können Kund*innen die individuellen Angebote von einzelnen Betreibern erneuerbarer Energieanlagen zur Deckung des Verbrauchs selbst zusammenstellen, was auch kurzfristig änderbar ist. Bei vorhandenem Smart Meter

können die Verbrauchsdaten der Kund*innen alle 15 Minuten ausgewertet und somit im Vergleich bei Verwendung von Standardlastprofilen besser mit der Erzeugungsseite zusammengebracht werden. Eine direkte Steuerung von Verbrauch und Anlagen erfolgt dabei aber bislang nicht. Die Transaktionen werden mittels Blockchain ausgeführt (ContextCrew 2019; WSW Wuppertaler Stadtwerke 2022). Ein weiteres Beispiel für Peer-to-Peer-Handel ist der „Altdorfer Flexmarkt“, bei dem dezentrale Flexibilität kostenoptimiert zur Verteilnetzstabilisierung aus einem Angebotspool aus verschiedenen Erzeugern und Verbrauchern beschafft werden können.

Aggregatoren und virtuelle Kraftwerke

Aggregatoren sind eine neue Art von Energiedienstleister, die den Stromverbrauch einer Gruppe von Verbraucher*innen je nach Bedarf und Netzzuständen erhöhen oder drosseln kann. Über eine geeignete Kommunikationsschnittstelle können sie Einfluss auf angeschlossene, technische Einheiten nehmen und derart steuern, dass sie ein Portfolio bilden, mit dem der Aggregator auf den Stromgroßhandels- und Systemdienstleistungsmärkten aktiv sein kann. Einheiten können dezentrale Marktakteure wie Verbraucher*innen, Prosument*innen, aktive Kund*innen (z. B. mit preisdynamischen Tarifen) und Energiegemeinschaften sein. Aggregatoren bilden ferner die Grundlage für umfassendere Flexibilitätsplattformen, bei denen Anlagen wie PV, Wärmepumpen, Batterien und Wärmespeicher und EV-Batterien zu virtuellen Kraftwerken kombiniert und ferngesteuert werden (Giehl et al. 2019a; Gui und MacGill 2018; Mlinarič et al. 2019; Löbbe und Hackbarth 2017).

Die Firma Sonnen organisiert überregional mehrere tausend PV-Batteriespeicher unter 25 kW Leistung in einem virtuellen Kraftwerk, das für die Erbringung von Primärregelleistung präqualifiziert ist. Grundlage ist eine selbst entwickelte Software, die die Anlagen koordiniert und eine sichere Kommunikation mit den Übertragungsnetzbetreibern über das öffentliche Internet ermöglicht. Die Funktionsfähigkeit des virtuellen Kraftwerks ist auch bei Ausfall der Kommunikationsinfrastruktur sichergestellt. Perspektivisch können weitere Kleinanlagen wie Wärmepumpen, E-Mobile oder Klimaanlage in den Pool aufgenommen werden. Weitere Anwendungen für das virtuelle Kraftwerk konnten ebenfalls demonstriert werden: das Netzmanagement in Verteilnetzen, Redispatch und „nutzen statt abregeln“. Hierbei werden die Transaktionen mit den Flexibilitätsnachfragern mitunter über Smart Contracts getätigt, in einer Blockchain dokumentiert und per Kryptowährung abgerechnet (Palla 2020; Palla 2018; Preiß 2020; Preiß 2017). Die Firma Lichtblick bietet mit der sogenannten „Schwarmatterie“ ein ähnliches Modell für private Batteriespeicher an. Ein Beispiel für die Aggregation von Wärmepumpen zur Erbringung von Systemdienstleistungen ist das Projekt ViFlex der Firma Viessmann. Auffällig bei diesen Modellen ist, dass die Aggregatoren von kleinen technischen Einheiten häufig auch Anbieter für die dazugehörige Energietechnik (Speicher, PV-Anlage oder Wärmepumpen) sind.

Einen kleineren geografischen Fokus hat das virtuelle Bürgerkraftwerk der EWS Schönau. Es verknüpft rund 30 private und gewerbliche Teilnehmende aus fünf Netzgebieten, die mit PV-Anlagen (insgesamt 370 kWp), Speichern, E-Mobilen, Brennstoffzellen, Wärmepumpen, Heizstäben und kleineren Blockheizkraftwerken ausgestattet sind, zu einer virtuellen Einheit. Mieterstrom-Objekte und Nahwärmenetze sind ebenfalls vertreten. Als digitale Elemente kommen ein Energiemanagementsystem, intelligente Messsysteme und CLS-Boxen für die Anlagensteuerung zum Einsatz. Weiterhin können die Nutzer*innen mittels App und Internetportal die Energieflüsse live nachvollziehen. Grundlage ist eine 15-Minuten-genaue Messung und Datenübertragung über die Smart Meter Gateways. Neben der Optimierung des Eigenverbrauchs ist es erklärtes Ziel des Projektes,

Flexibilitäten derart zu organisieren, dass Stromüberschüsse genutzt und die Anlagen netzdienlich gesteuert werden (Coneva 2020; EWS Schönau 2022; 50,2 online 2020).

Der übergreifende Blick auf die Beispiele macht entlang bestimmter Geschäftsmodelldimensionen zwischen und innerhalb der Konzepte Bandbreiten für die Ausgestaltung deutlich:

- Nutzendimension: Die erbrachten Dienstleistungen können sich auf die reine Energiebereitstellung für kleine Akteure konzentrieren (ggf. inkl. Verkauf der Energietechnik), auf Systemdienstleistungen und Energiebereitstellung für vorgelagerte Energiemärkte oder es kann beides bedient werden. Somit kann der geografische Bezug des Nutzenversprechens lokal, regional oder überregional ausgerichtet sein.
- Partnerdimension: Als Partner zur Darstellung der Dienstleistungserbringung können Akteure aus verschiedenen Bereichen beteiligt sein. Zu beobachten sind Hersteller von IKT und Energietechnologien, Softwareentwicklungsfirmen, klassische Energieversorger sowie Start-ups, die als Energiemanager und Plattformbetreiber auftreten.
- Kundendimension: Kund*innen bzw. die Akteure, die die dezentralen Energieressourcen bereitstellen, können private Haushalte aber auch klein- und mittelständische Gewerbe sein, die Energie bereitstellen, verbrauchen und speichern. Demgegenüber stehen die Kund*innen außerhalb der Community wie z. B. Übertragungsnetzbetreiber oder Großhandelskunden an den Energiemärkten.
- Wertschöpfungsdimension: Die Bandbreite der eingebundenen Energietechnologien umfasst eine Reihe von nachfrageseitigen Systemen (Wärmepumpen, Nachtspeicherheizungen, Heizstäbe), angebotsseitigen Technologien (PV-Anlagen, BHKWs, Brennstoffzellen), Speichern (große und kleine Batteriespeicher, E-Mobile) und Strom- und Wärmenetzen zur Durchleitung. Die Bündelung der eingebundenen Energietechnologien kann lokal, regional oder überregional ausgerichtet sein. Digitale Systeme, die als Enabler integriert sind, umfassen Smart Meter, Smart Meter Gateways, CLS-Boxen und Energiemanagementsysteme für Messung, Informationsweitergabe und Steuerung von Energieflüssen, Smartphone-Applikationen und Internetportale zur Kund*innenkommunikation sowie Blockchains, Kryptowährungen und Smart Contracts für die finanzielle Abwicklung der Prozesse.

4.3 Herausforderungen und Risiken von digitalen Energiegemeinschaften

Die vergleichsweise innovativen Konzepte digitaler Energiegemeinschaften sehen sich einer Reihe von Herausforderungen gegenüber, die in den kommenden Jahren zu bewältigen sind, um die Modelle in die Breite zu tragen und einen effektiven und nachhaltigen Beitrag zum Gelingen der Energiewende zu leisten.

Wirtschaftliche Herausforderungen

Die Umsetzung von Energiegemeinschaften steht den begrenzten Investitionsmöglichkeiten der Teilnehmenden gegenüber, was den Handlungsspielraum und den Projektumfang der Projekte einschränkt. Kostenbezogene Größenvorteile (Economies of Scale) sind dadurch nur schwer zu heben (Gui und MacGill 2018). Das wirtschaftliche Interesse von Dritten (z. B. Technologiehersteller,

Netzbetreiber) an solchen Geschäftsmodellen ist daher nicht besonders ausgeprägt (Sousa et al. 2019).

Der notwendige regulatorische Rahmen zur weitflächigen Umsetzung von Energiegemeinschaften oder vollen Nutzung der damit verbundenen Potenziale ist oftmals noch nicht vorhanden (Blasch et al. 2021). Notwendige Änderungen betreffen eine Vielzahl von Akteuren entlang der klassischen Wertschöpfungskette in der Energiewirtschaft und entwickeln sich daher nicht mit der Geschwindigkeit, in der neue Technologien und Geschäftsmodelle auftreten (Zhou et al. 2020). Da die Geschäftsmodelle der klassischen Energieversorger außerdem durch Energiegemeinschaften gefährdet sein können, ist eine Unterstützung für regulatorische Anpassungen kaum zu erwarten (Gui und MacGill 2018).

Die derzeitig noch vorhandenen regulatorischen Hürden für Energiegemeinschaften können auch finanzielle Auswirkungen für beteiligte Akteure bedeuten. In Deutschland verhindert die derzeitige Ausgestaltung von Netzentgelten, Steuern, Abgaben und Umlagen oftmals den wirtschaftlichen Betrieb von Energiegemeinschaften, insbesondere von überregionalen Modellen wie virtuellen Kraftwerken (Gähns et al. 2021b). Vor diesem Hintergrund ist zu prüfen, inwieweit diese Strompreisbestandteile im Falle der Energiegemeinschaften und den erbrachten Dienstleistungen sachgerecht sind. Darüber hinaus sind die in national umgesetzten regulatorischen Definitionen von Energiegemeinschaften unterschiedlich restriktiv und komplex. So können z. B. nicht alle vorgestellten Formen von Energiegemeinschaften abgedeckt sein oder hohe bürokratische Hürden Projekte unattraktiv oder unwirtschaftlich werden, was in Summe die Ausweitung der Konzepte behindert (Palm 2021).

Technische Herausforderungen

Eine technische Hürde stellt der Anschluss und die Integration der Modelle in die bestehenden Stromnetzinfrastrukturen dar. Hier müssen bestimmte Qualitäts- und Sicherheitsanforderungen erfüllt und die ständige Verfügbarkeit gewährleistet werden, z. B. für die Erbringung von Primärregelleistung (Gähns et al. 2021b). Hinzu kommt die technische Komplexität, die durch die Koordination der Vielzahl an einzubindenden Akteuren und dezentralen technischen Einheiten herausfordernd ist (Gui und MacGill 2018; Sousa et al. 2019).

Durch das kollektive Agieren können sich Gleichzeitigkeitseffekte einstellen, z. B. durch das synchrone Laden von Batterien, welche Netze zusätzlich belasten und Bedarfe für Netzverstärkungen auslösen können (Mlinarič et al. 2019) (siehe auch Kap. 3.3). Beim Fehlen zentraler, koordinierender Akteure für die Gemeinschaft ist die Vorhersehbarkeit des Verhaltens ein weiteres Problem für die Netzbetreiber (Sousa et al. 2019). Das Beispiel der Gleichzeitigkeitseffekte zeigt auch, dass Energiegemeinschaften von den derzeitigen und zukünftigen technischen Netzinfrastrukturen abhängig sind (Gui und MacGill 2018).

Als technische Herausforderung kommt die Implementierung, Nutzung und Wartung der notwendigen Kommunikations- und Steuerungsinfrastrukturen hinzu, welche neben den Anforderungen an die Funktionsfähigkeit die Richtlinien für Datenschutz und -sicherheit erfüllen müssen (Sousa et al. 2019).

Ökologische Herausforderungen

Der ökologische Nutzen von Energiegemeinschaften kann darin liegen, energietechnische Anlagen zu errichten, besser auszunutzen und Flexibilität bereitzustellen. Dadurch sollen erneuerbare Energien besser integriert, konventionelle Energieträger verdrängt und Netzausbau vermieden werden, womit vor allem ein ökologischer Nutzen auf Systemebene und bei den Haushalten erzielt werden kann (Gähns et al. 2021b). Andererseits bedeutet die Herstellung und der Betrieb der notwendigen IKT und MSR-Technik einen zusätzlichen Ressourcen- und Energieaufwand (Sousa et al. 2019; Gähns et al. 2021b). Hierzu zählen auch Aufwendungen für Hintergrundprozesse wie Transaktionen über Blockchains und die Nutzung von Kryptowährungen, die hohe ökologische Belastungen bedeuten können (Schinckus 2021). Rebound-, Suffizienz- und andere nutzungsbezogene Effekte können sich ebenfalls signifikant auf das Umweltergebnis von digitalen Anwendungen im Allgemeinen (Pohl et al. 2019) und bei Ansätzen in Verbindung mit erneuerbaren Energien im Spezielleren auswirken (Galvin et al. 2021; Galvin et al. 2022). Ganzheitliche Untersuchungen zu den Umweltlasten und -nutzen von digitalen Energiegemeinschaften liegen bislang kaum vor (Gähns et al. 2021b).

Soziale Herausforderungen

Die vorgestellten Modelle von (digitalen) Energiegemeinschaften setzen unterschiedliche Grade an Zusammenhalt zwischen den beteiligten Akteuren voraus. Insbesondere die lokal ausgerichteten Konzepte bedürfen eines höheren Maßes an Kohäsion zwischen den Teilnehmenden der Energiegemeinschaft, das vorab hergestellt werden muss, um erfolgreich zu sein. Andererseits können ein hoher Zusammenhalt und ein hohes Maß an Koordination geringere Kapazitäten für soziale und technische Innovationen implizieren (Gui und MacGill 2018).

Das Verhalten der Teilnehmenden im Betrieb der Gemeinschaften ist sehr komplex und mit Unsicherheiten behaftet (Zhou et al. 2020). Außerdem besteht die Befürchtung, dass die Motivation zur aktiven Teilnahme an Handelskonzepten nicht sehr ausgeprägt ist, wie es allgemein bei Stromprodukten der Fall ist (Sousa et al. 2019). Somit stellt sich die Frage, wie anhaltend potenzielle positive Effekte von Energiegemeinschaften sind und durch welche Maßnahmen der langfristige Erfolg gesichert werden kann.

Eine Barriere zur weitflächigen Umsetzung von digitalen Energiegemeinschaften sind Vorbehalte von potenziellen Teilnehmenden gegenüber zusätzlichen IKT-Infrastrukturen im Haushalt und der Steuerung von privaten technischen Anlagen durch Dritte von außen (Moshövel et al. 2015).

5 Digitale Produkte und Tools in kommunalen Prozessen

5.1 Formen von Beteiligung und die Rolle digitaler Tools

Im Kontext der digitalen Transformation und dem damit verbundenen digitalen Wandel eröffnen sich neue digitale Möglichkeiten, Methoden und Werkzeuge für die Einbindung lokaler Akteure in verschiedenen Wirkungsbereichen wie der Planung, Entwicklung und Durchführung neuer Energieversorgungsstrukturen. Im Bereich der Stadtplanung werden eine Vielzahl digitaler Tools und Pro-

dukte bereits umfassend genutzt und eingesetzt, um die Öffentlichkeit und Bürger*innen in Planungs- und Entscheidungsprozesse einzubinden (Hasler et al. 2017; Kleinhans et al. 2015; Seltzer und Mahmoudi 2013). Viele Städte besitzen eigene webbasierte Plattformen, die verschiedene Funktionen integrieren, die von einer reinen Informationsbasis bis zur kollaborativen Gestaltung reichen. Funktionen umfassen u. a. Umfragen, die Möglichkeit Kommentare abzugeben oder sogar kartenbasiert räumlich planen zu können. Verwendet werden hier u. a. Mapping- oder Crowdsourcing-Tools, um Meinungen und Wissen der lokalen Bevölkerung in kommunale Entscheidungsprozesse zu integrieren (Stadt Hamburg 2022; Stadt Würzburg 2022). Des Weiteren wurden in den letzten Jahren – auch pandemiebedingt – vermehrt Workshops, Bürger*innenräte und andere Veranstaltungen digital abgehalten (Schiebe 2020). Auch Energie- und Klimathemen spielen in diesem Kontext häufig eine Rolle. Digitale Tools werden hier auf politisch-gesellschaftlicher Ebene zur (gegenseitigen) Informierung, zur Konsultation oder kooperativen Entscheidungsfindung eingesetzt, jedoch auch im energiewirtschaftlichen Kontext, z. B. zur Förderung finanzieller Beteiligungsprozesse an Infrastrukturprojekten für erneuerbare Energien oder zur internen Vernetzung von Energiegemeinschaften auf lokaler Ebene. Digitale Werkzeuge und Produkte können auf vielfältige Weise zur Partizipation in kommunalen Entscheidungsprozessen eingesetzt werden und lassen sich demnach auf verschiedene Art differenzieren und kategorisieren.

Grad und Tiefe der Beteiligung

Basierend auf Arnstein's Konzept der „Ladder of Citizen Participation“ (1969) lassen sich (digitale) Beteiligungsinstrumente nach Grad oder Tiefe der Beteiligung kategorisieren. Die Partizipationsleiter setzt sich aus acht Stufen zusammen, diese reichen von sogenannten manipulativen Prozessen über Konsultation bis hin zur Selbststeuerung der Bürger*innen und werden in drei Großgruppen zusammengefasst: „keine Beteiligung“, „Scheinbeteiligung“ und „Bürger*innenmacht“ (Arnstein 1969). Heutige Evaluationsschemata bedienen sich häufig Arnsteins Überlegungen und passen diese an ihre jeweiligen analytischen Betrachtungen an (Hasler et al. 2017; International Federation 2018). Hasler et al. (2017) erweitern das Konzept Arnsteins um digitale Aspekte nach Art, Richtung und Intensität des Austauschs. Auf den niedrigsten Stufen, den Informationsebenen, ist die Kommunikation einseitig. Es werden Informationen geteilt, doch es findet kein Austausch statt. Auf der Konsultationsebene (Consultation) beantworten Bürger*innen Fragen der Kommunalverwaltungen, z. B. durch Online-Umfragen. Auf der Mitwirkungsebene (Contribution) wird Bürger*innen über Plattformen oder Apps mit Kommentarfunktionen ermöglicht, Meinungen oder Wissen zu speziellen Themen und Projekten zu teilen. Diese sind nicht auf geschlossene Fragen limitiert und es kann ein Austausch stattfinden. Auf der Kollaborationsebene (Collaboration) können Bürger*innen frei interagieren, Ideen und Vorschläge austauschen und andere Vorschläge kommentieren oder bewerten. Die höchste Stufe bezeichnen Hasler et al. (2017) als Empowerment, eine Ermächtigung der Bürger*innen im Entscheidungsprozess. Mukhtarov et al. (2018) differenzieren die Nutzung digitaler Tools und Produkte nicht nach Abstufung, sondern nach Interaktionsformen zwischen Regierenden und Bürger*innen. Dazu unterscheiden sie zwischen

- Government as platform (G2C): Regierungen stellen Daten zur informierten Entscheidungsfindung bereit, um Transparenz, Vertrauen und Legitimität zu erhöhen
- Citizen Sourcing (C2G): Bürger*innen teilen (bottom-up oder top-down) Meinungen untereinander und mit Regierenden zu Planungen und Planungszwecken (Crowdsourcing)
- „Do it yourself“ Government (C2C) wird durch selbstorganisierte Bürger*innen mit gar keiner oder geringer Mitwirkung der Regierung charakterisiert und

- Collaborative planning and groupware (GwC) umfasst die gemeinsame Problemlösung mithilfe von Visualisierungen, Szenarienbildung und kontinuierlichem Face-to-Face-Kontakt.

Diese Klassifizierungen beziehen sich auf die Art und Intensität der Kommunikation, des Austausches und der Mitwirkung.

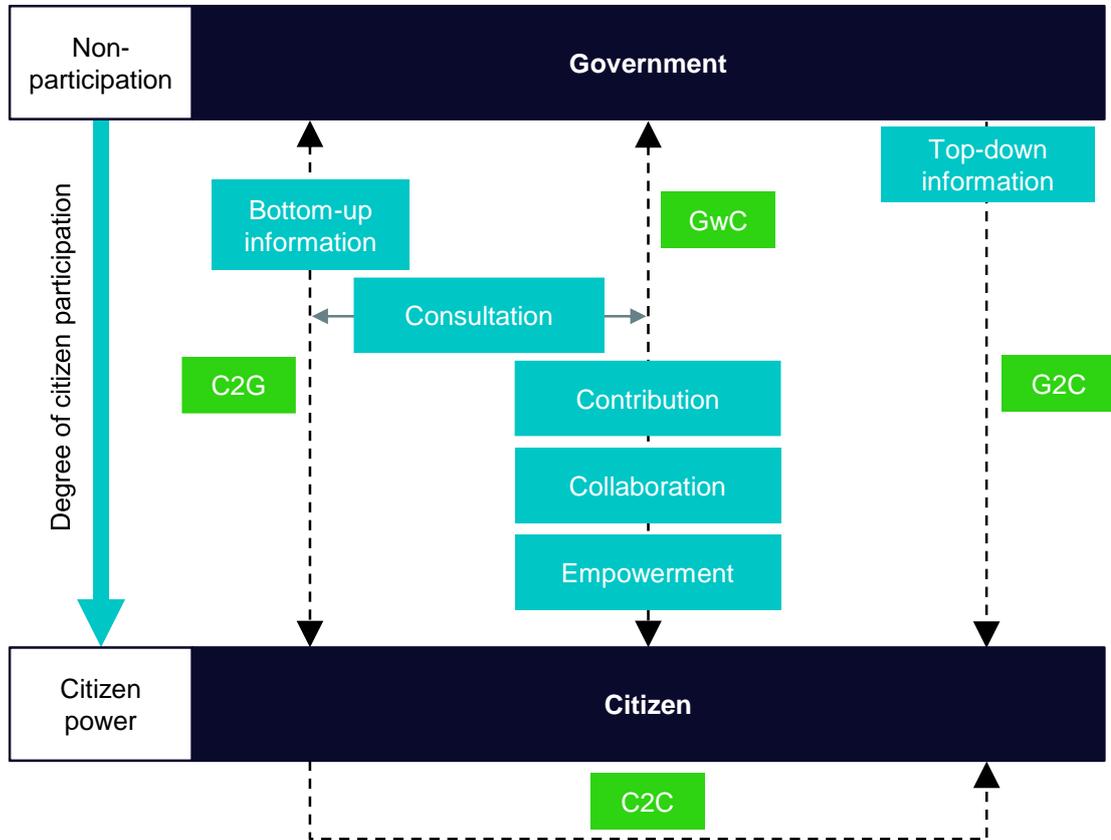


Abbildung 5: Kategorisierung (digitaler) Beteiligungselemente, eigene Darstellung nach Hasler et al. (2017) und Mukhtarov et al. (2018)

Weitere Möglichkeiten der Klassifizierung umfassen die Unterscheidung nach der Art des Tools, z. B. webbasierten Partizipationsplattformen und mobilen Partizipations-Applikationen sowie ihren Möglichkeiten und Funktionen (Gün et al. 2020). Als webbasierte Partizipationsplattformen werden u. a. digitale Partizipationsportale, Spiele und desktopbasierte Applikationsplattformen genannt, die darauf abzielen, Informationen zu sammeln, zu analysieren, zu visualisieren sowie Informationen, Expertise und Lösungsvorschläge zu verbreiten. Funktionen umfassen 2D- und 3D-Geovisualisierungen, Web 2.0-Kollaborationswerkzeuge, wie kollaboratives Mapping und interaktive Skizzen, Bewertung und Klassifizierung von Vorschlägen, so dass Nutzer*innen (urbane) Projekte in kollaborativer Umgebung visualisieren, beeinflussen und diskutieren können.

Ziele der Beteiligung

Digitale Tools und Produkte können zudem nach der jeweiligen Phase des Planungsprozesses und den damit zusammenhängenden Zielen unterschieden werden (Gün et al. 2020; Hasler et al. 2017). In der frühen oder diagnostischen Phase eines Planungsprozesses kann das Ziel sein, Meinungen, Hemmnisse und Mängel zu identifizieren, wofür Crowdsourcing-Tools oder kollaborative

Mapping-Tools (z. B. PPGIS) eingesetzt werden können. In der Entwicklungsphase eines Projektes, einer Vision oder neuer Stadt- oder Regionalentwicklungspläne können Modellierungs-, Simulations- oder Szenarienentwicklungs-Tools, die den Partizipierenden zur Information oder zur kollaborativen Gestaltung zur Verfügung gestellt werden, sinnvoll sein, um Prognosen zu erstellen sowie Präferenzen und Vorschläge abzuwägen. In der Entscheidungsphase geht es um die Bewertung und das Feedback zu bereits entwickelten Plänen oder Projektentwürfen. In dieser späteren Phase sprechen Münster et al. (2017) Visualisierungstechniken, wie 3D-Umgebungen und Augmented Reality (AR), eine höhere Bedeutung zu, um Projekte für Beteiligte oder Betroffene erfahrbarer zu machen. Zusätzlich zu diesen inhalts- und ergebnisorientierten Zielen von Partizipation, wie die Ermittlung von Informationen über lokale Gegebenheiten oder Meinungen der Bevölkerung, können auch übergeordnete Ziele verfolgt werden. Newig et al. (2013) nennen hier u. a. die Information, Sensibilisierung, Bildung, Motivierung von potenziell Betroffenen/Bürger*innen, das Erreichen (demokratischer) Legitimität, Konfliktminderung, Konfliktlösung und Kompromissfindung oder das Verbreiten bzw. Umsetzen von Erkenntnissen, die Befähigung zum Handeln oder Vernetzung. Klessmann et al. (2014) differenzieren hier zwischen

1. dem Erzielen lösungsrelevanter Informationen,
2. dem Ziel eine möglichst große Anzahl an Teilnehmer*innen zu erreichen,
3. dem Ziel, Präferenzen und Meinungen von Bürger*innen abzubilden und unterschiedliche Interessen auszugleichen und möglichst der soziodemografischen Struktur der Zielgruppe zu entsprechen,
4. die Hintergründe für Entscheidungen deutlich machen und die Zufriedenheit mit geplanten Maßnahmen zu steigern (Akzeptanz) und
5. das politische Engagement der Teilnehmenden zu fördern und ihr Vertrauen in die demokratischen Prozesse zu stärken.

5.2 Differenzierung digitaler Tools zur Partizipation im Kontext der Energiewende

In energiepolitischen Partizipationsprozessen auf kommunaler Ebene können digitale Tools in verschiedenen Kontexten eingesetzt werden. Zunächst einmal kann betrachtet werden, welche kommunalpolitischen Handlungsmöglichkeiten zum Ausbau der erneuerbaren Energien bestehen und wie Bürger*innen daran beteiligt werden können. Kommunalpolitische Handlungsmöglichkeiten zum Ausbau der erneuerbaren Energien umfassen übergreifende Maßnahmen, wie die Entwicklung von Energie- und Klimaschutzkonzepten und lokalen Zielsetzungen, die Ausweisung von Eigenschaftsflächen für erneuerbare Energien durch Flächennutzungspläne, die Beteiligung an Regionalplänen oder die gemeinsame interkommunale Ausweisung von Windenergie-Vorranggebieten. Im Bereich der Regulierung und Planung können für Bebauungspläne oder Gebäude energiebezogene Vorgaben gemacht werden. Kommunale Eigenbetriebe oder privatrechtliche Unternehmen im kommunalen Eigentum können über Stadtwerke eigene (erneuerbare) Energie anbieten. Sie können zudem in der Öffentlichkeits- und Bildungsarbeit tätig werden oder Investitionen in Erneuerbare-Energien-Projekte fördern und unterstützen. Auch die Möglichkeit finanzieller Beteiligung von Bürger*innen an Erneuerbaren-Energien-Anlagen kann Auswirkungen auf politische Entscheidungsprozesse und eine erfolgreiche Umsetzung der kommunalen Energiewende haben (u. a. Holstenkamp et al. 2018). Einige der genutzten Tools und Produkte, von der rein informativen

Webseite bis zu Augmented- & Virtual-Reality-Anwendungen, sollen hier im energiespezifischen Kontext vorgestellt werden.

Projekt-Webseite / Kommunale Webseite

Auf einer reinen Top-down Informationsebene (G2C) werden digitale Tools, wie Webseiten in Kommunen, bereits genutzt, um über Entscheidungsprozesse und geplante Infrastrukturprojekte, wie den Bau Erneuerbarer-Energien-Anlagen, zu informieren und diese potenziell auch zu visualisieren (Energieagentur Ebersberg-München 2022; Stadt Bornheim 2022). Webseiten können zudem dazu dienen über politische, aber auch finanzielle Beteiligungsoptionen zu informieren.

Exkurs: Beteiligungsplattformen für finanzielle Beteiligung

Im Bereich der finanziellen Beteiligung werden digitale Tools ebenfalls eingesetzt, um Komplexität zu reduzieren, potenziell eine Mehrzahl an lokalen Akteuren zu erreichen und diese aktiv in die Gestaltung der Energiewende einzubeziehen. Sie können zudem das Ziel verfolgen finanzielle Beteiligungsprozesse zu standardisieren und den Organisationsaufwand zu reduzieren. Dies kann über externe Plattformen (z. B. von Banken) erfolgen oder es können eigene Beteiligungsplattformen der jeweiligen Anbieter (z. B. Stadtwerke oder Energieversorgungsunternehmen) erstellt werden. Diese Plattformen können auch dazu genutzt werden, Interesse und Beteiligungshöhe bei den Bürger*innen abzufragen. Digitale Bürger*innenbeteiligung versetzt Stadtwerke und Energieversorgungsunternehmen auch in die Lage, zukünftige oder wiederkehrende Angebote finanzieller Bürger*innenbeteiligungen skalierbar zu machen (Eueco 2021).

Discussionboards / Online-Forum / Online-Umfragen

Discussionboards und Online-Foren sind virtuelle Orte im Internet, die dem Austausch und der Archivierung von Meinungen, Gedanken und Erfahrungen dienen, diese können zur Konsultation (C2G), aber auch zur Mitwirkung und Kooperation (GwC) genutzt werden. Hierbei erfolgt die Kommunikation asynchron, also mit zeitversetzten Reaktionen. Die Zeit- und Ortsunabhängigkeit solcher Formate wird als Möglichkeit betrachtet, eine größere oder diversere Gruppe an Menschen in den Beteiligungsprozess zu integrieren. Sie können sich somit zu einem späteren Zeitpunkt in die Diskussion einbringen. Online-Umfragen werden zur empirischen Meinungsforschung eingesetzt und dienen vor allem der Konsultation (C2G oder GwC). Diese können dazu dienen, gezielte Stimms- und Meinungsbilder zu konkreten Projektideen und -entwürfen zu generieren. Der auszufüllende Fragebogen wird auf einem Webserver abgelegt, entweder als HTML oder innerhalb der auf dem Server genutzten Befragungssoftware (Schiebe 2020). Klima- und Energiethemen werden zunehmend in solchen Mitmach-Portalen oder auf kommunalen Websites mit Feedbackfunktionen, Umfragen oder Diskussionsforen in Städten und Regionen behandelt (Stadt Würzburg 2022; Zeballog 2015).

Mapping

Unter Mapping versteht man eine Verortung von Inhalten auf georeferenzierten Karten. Beispielsweise können in einer Beteiligung bestimmte Orte auf einer vorher aufbereiteten Karte vermerkt und dargestellt werden. Dies wird auch als Form einer Public Participatory Geographic Information Systems (PPGIS – Öffentlich partizipative GIS-)Methode bezeichnet. Im Nachgang können diese

Informationen von Planer*innen ausgewertet werden, um vielfältige Informationen zu ortsspezifischen Projekten zu gewinnen. Der Austausch findet also meist auf einer Mitwirkungs- und Kollaborationsebene (GwC) statt. PPGIS werden im Energiekontext z. B. für die Identifikation und Eignung von Windvorrangflächen genutzt (Mekonnen und Gorsevski 2015) oder auch zur Beteiligung an Energie- und Klimaschutzkonzepten und zur räumlichen Verortung von konkreten Ideen und Maßnahmen in diesem Kontext. Diese können entsprechend auch auf Projekt- oder kommunalen Webseiten integriert werden und mit anderen Formaten kombiniert werden (Stadt Dresden 2022).

Videotelefonat / -konferenz

Videotelefonate und -konferenzen sind geeignet, um eine Vielzahl von Personen in Echtzeit miteinander kommunizieren zu lassen und in den Austausch zu bringen. Videokonferenzen oder -telefonate können in einer Vielzahl digitaler oder hybrider Formate eingesetzt werden (Schiebe 2020). Im Energie- und Klimabereich wurden Projekte aufgrund der Covid-19-Pandemie in den digitalen Raum verlagert, wie die digitale Ergebniskonferenz und Podiumsdiskussion zum Westküstendialog in Schleswig-Holstein (TenneT 2020). Ebenso auf nationaler Ebene der „Bürgerrat Klima“, in welchem zufällig ausgeloste Bürger*innen mögliche Maßnahmen zum Umgang mit der Klimakrise diskutierten und Politikempfehlungen zur Einhaltung der Pariser Klimaziele entwickelten (Bürgerrat Klima 2022). Auch wenn Videokonferenzformate zur reinen Top-down Informationsvermittlung (G2C) in Planungsverfahren genutzt werden können, können sie im Kontext der genannten Beispiele vor allem der Mitwirkungs- und Kollaborationsebene zugeordnet werden (GwC).

Virtual & Augmented Reality

„Augmented Reality“ (AR, dt. erweiterte Realität) steht für eine Visualisierungsmethode, die mithilfe von computerbasierter Simulation ein Abbild der Realität erstellt. Virtuelle und physische Realität lassen sich verknüpfen, um z. B. Entwürfe von Infrastrukturprojekten auf ihre späteren Standorte zu projizieren. In der Augmented Reality wird die reale Umgebung um virtuelle Informationen erweitert, während in der Virtual Reality ein vollständig virtueller Raum geschaffen wird (Schiebe 2020). Es wird im energiepolitischen Kontext zunehmend auf die Potenziale von Visualisierungstools aus den Bereichen Virtual Reality (VR) und Augmented Reality (AR) verwiesen, um eine realitätsnahe Darstellung der Planungen zu ermöglichen sowie Zugangsbarrieren und Komplexität bei der Planung von EE-Infrastrukturprojekten zu reduzieren und somit Inklusivität und Repräsentativität in Planungs- und Beteiligungsprozessen zu fördern (Deckert et al. 2020; Kauling et al. 2021; Spieker 2018; Spieker et al. 2017). Sie können somit zur reinen Informationsvermittlung dienen (G2C), können aber auch interaktiv zur Integration von Vorschlägen und Meinungen genutzt werden (GwC). Im Projekt zum Pumpspeicherkraftwerk in Forbach konnte von teilnehmenden Bürger*innen bestätigt werden, dass Komplexität durch Virtual Reality-Tools reduziert wurde. Projektmanager*innen nannten die frühzeitige Identifikation von Konfliktpotenzial als weiteres Potenzial dieser Tools (Deckert et al. 2020).

Simulations- und Berechnungstools

Der Einsatz von simulationsbasierten Tools in Beteiligungsprozessen ist eine neue Herangehensweise und bietet die Möglichkeit, Zusammenhänge zwischen den einzelnen Sektoren (Strom, Wärme, Mobilität), Klimaauswirkungen und Erzeugungstechnologien herzustellen und anschaulich aufzubereiten (Fiukowski et al. 2019). Im Online-Potenzialrechner ERNEUERBAR KOMM! Beispielsweise werden klassische Geobasisdaten der Katasterverwaltung (ALKIS) und Informationen

aus dem Digitalen Landschaftsmodell (DLM) gemeinsam mit weiteren raumbezogenen Daten, beispielsweise zu Windgeschwindigkeiten, solaren Einstrahlungswerten, Schutzgebieten, ausgewertet und überlagert. Am Online-Rechner kann sich jede*r Bürger*in, Gemeinderät*in oder Bürgermeister*in nicht nur das theoretisch vorhandene technische Potenzial anschauen, sondern anhand des sogenannten „Mobilisierungsfaktors“ den gewünschten Energiemix selbst zusammenstellen (Klärle und Langendörfer 2011). Dies kann einerseits der Information (G2C) dienen, ermöglicht aber auch die kollaborative Einbindung von Stakeholdern in die Entwicklung von Energieszenarien (GwC). Die partizipative Gestaltung von Energieszenarien kann helfen, Ungleichheiten im Wissensstand auszugleichen, komplexe Zusammenhänge des lokalen Energiesystems zu verdeutlichen und den Akteuren einen Einblick in neue Perspektiven zu ermöglichen (Fiukowski et al. 2019).

Exkurs: Umsetzung von (digitalen) Energiegemeinschaften

In der Umsetzung dezentraler, digitaler Energiegemeinschaften auf kommunaler Ebene können digitale Tools und Service-Plattformen genutzt werden, um sich zu vernetzen, lokalen Energiehandel zu betreiben und Energieerzeugung und -verbrauch effizient zu managen. Im Energetischen Nachbarschaftsquartier Oldenburg Fliegerhorst im Quartier Helleheide wird dies in Form eines digitalen Zwillings der physischen Infrastruktur umgesetzt (OFFIS e. V. 2021). Dies kann als ein Produkt betrachtet werden, welches das Ziel verfolgt, Selbstorganisation der Bewohner*innen und den lokalen Austausch von Ressourcen zu fördern.

Gamification

Spielerische Ansätze können genutzt werden, um eine Vielzahl von Inhalten in Beteiligungsprozesse zu integrieren. Gamification beschreibt die Anwendung spieltypischer Elemente in einem spielfremden Zusammenhang. Diese Elemente umfassen z. B. Erfahrungspunkte, Highscores, Fortschrittsbalken, Ranglisten, virtuelle Güter oder Auszeichnungen (Schiebe 2020). Viele Spiele im Energiekontext fokussieren sich auf Energieeinsparungen in Haushalten und die Konsument*innenebene (z. B. „Energy Chickens“, „Energy Cat“) (Romanov und Holler 2021). Unkonventionelle Methoden, wie Gamification, können dazu beitragen, das öffentliche Bewusstsein zu diesem Thema und die Motivation, sich damit zu befassen, zu steigern. Im Vordergrund steht hierbei die niedrigschwellige Informationsvermittlung (G2C), die insbesondere auch weitere Zielgruppen, wie Kinder oder Jugendliche, für Planungsinhalte begeistern kann (Romanov und Holler 2021; Schiebe 2020). Einige Prozesse und Fallbeispiele aus dem energiepolitischen Kontext, in denen digitale Tools zur partizipativen Gestaltung eingesetzt wurden, sind in Tabelle 3 aufgelistet. Diese verdeutlichen die Vielfältigkeit der genutzten Tools und die damit verbundenen Zielsetzungen.

Tabelle 3: Beispiele für den Einsatz von digitalen Tools im energiepolitischen Kontext

Digitales Format	Beispielprojekte	Technologie(n)	Art der Beteiligung	Ziel(e)	Planungskontext
Discussion-board / Online-Forum / Online Umfrage	Dialogorientierte Beteiligungsplattform zu Standorten für Windenergieanlagen in Heidelberg, Deutschland (ZebraLog 2015)	Wind	Informationsebene (G2C) und Mitwirkungsebene (GwC); Tool online nutzbar	Präferenzen und Gründe für Vorrangflächen verschiedener Bürger*innen erfassen	Definition von Konzentrationszonen im Flächennutzungsplan
Videotelefonat-/konferenz	Dialogverfahren Westküstenleitung: Klixbüll (Niebüll) – Grenze Dänemark – Digitale Ergebniskonferenz (TenneT 2020)	Stromnetz	Informationsebene (G2C), Mitwirkungsebene (GwC); Tool online nutzbar	Bewertung und Feedback zu Plänen oder Projektentwürfen	Trassenverlaufsplanung; Raum- und Infrastrukturplanung
Mapping	Interaktive und kollaborative Bestimmung von Vorrangflächen für EE in Dalfsen, Niederlande (Flacke und De Boer 2016)	PV & Wind	Mitwirkungs- und Kollaborationsebene (GwC); Stakeholder-Workshops mit Tools als Offline-Support vor Ort	Präferenzen und Gründe für Vorrangflächen verschiedener Stakeholder erfassen	Flächennutzungsplan (Raum- und Infrastrukturplanung)
Virtual Reality (VR) / Augmented Reality (AR)	Erweiterung Pumpspeicherkraftwerk in Forbach, Baden-Württemberg (Deckert et al. 2020)	Stromspeicher	Top-down Informations- und Mitwirkungsebene (G2C/ GwC); Tools als Offline Support vor Ort	Einbindung verschiedener Stakeholder; Meinungen, Hemmnisse identifizieren	Raum- und Infrastrukturplanung (Raumordnungsverfahren)
Simulationsbasierte Tools	Stakeholder Empowerment Tools (StEmp) in der Energiewende in regionalen Kontexten in Deutschland (Fiukowski et al. 2019)	Divers	Informations-, Konsultations- und Kooperationsebene (G2C/GwC); Tools primär online nutzbar	Inklusivität & Repräsentativität (Zugang und Wissensasymmetrien ausgleichen); Empowerment	Erstellung regionaler Klimaschutzkonzepte
Gamification	„Changing the Game“ App wurde im Energetischen Nachbarschaftsquartier Fliegerhorst Oldenburg konzipiert und soll komplexe Inhalte der Energiewende erlebbar machen (OFFIS e. V. 2022)	Divers	Informationsebene (G2C); Tool online nutzbar	Informieren, motivieren, sensibilisieren	Gestaltung der Energieversorgung eines Wohnquartiers (fiktiv)

5.3 Chancen und Risiken digitaler Teilhabeformate

Um Legitimität oder auch die Effektivität von Planungsprozessen zu fördern, werden Partizipation und Öffentlichkeitsbeteiligung als Erfolgsstrategien zur Konfliktbewältigung sowie der Förderung von Legitimität und Effektivität in Planungsprozessen der Energiewende hervorgehoben. Die Diskussion um die Rolle digitaler Tools in diesem Kontext bildet häufig zwei Extrempunkte ab: Zwischen Techno-Optimismus (bzw. Techno-Determinismus) und -Pessimismus (Schoßböck et al. 2018).

Die techno-optimistische Sicht und entsprechende Studien betrachten die Digitalisierung als Chance für bessere Partizipationsmöglichkeiten für die Gesellschaft und das Internet als Potenzial, um die Demokratie durch innovative Entscheidungsfindung zu fördern (Schoßböck et al. 2018). Einige Autor*innen argumentieren, dass die Nutzung digitaler Tools unter bestimmten Voraussetzungen positiv auf Faktoren, wie Inklusivität und Repräsentativität oder Demokratieförderung und Empowerment, einwirken kann (Deckert et al. 2020; Fiukowski et al. 2019; Ruddat und Mayer 2020; Spieker 2018). Deckert et al. (2020) nennen hier drei Potenziale digitaler Tools als Ergänzung in analogen Beteiligungsprozessen:

1. Beitrag zur Diversifizierung der Teilnehmenden zu leisten durch bessere Kommunikation und Information von Beteiligungsmöglichkeiten sowie die Mobilisierung neuer digital affiner Zielgruppen durch die Nutzung neuer Visualisierungs- und Simulationstools,
2. Reduktion von Komplexität und Senkung von Zugangsbarrieren zur Beteiligung, insbesondere durch Visualisierungen, und damit Integration lokalen Wissens, das die Qualität von Entscheidungen verbessern kann,
3. Verbesserte Ergebnispräsentation durch die Visualisierungen von Beteiligungsergebnissen, die es auch Entscheidungsträger*innen ermöglicht, Ergebnisse leichter zu interpretieren und verständlich zu machen.

Auch Kauling et al. (2021) heben Potenziale von Visualisierungstechnologien, wie GIS, Virtual und Augmented Reality, hervor. Dazu gehören, dass Planungsinhalte durch planungsintegrierte, flexible Visualisierungen frühzeitig dem öffentlichen Diskurs zugänglich gemacht werden können und durch die Bereitstellung von Visualisierungen über Alltagstechnologien einer breiten Bevölkerungsgruppe zugänglich gemacht werden.

Auf der Grundlage von Forschungsergebnissen zur „Digital Inequality“ wird hingegen argumentiert, dass es systematische Unterschiede in Hinblick auf den Grad partizipativer Nutzung digitaler Medien gibt und sozioökonomische Ungleichheiten der analogen Welt in der digitalen Welt gespiegelt oder sogar verstärkt werden können (Hoffmann 2020; Leitner 2018). Der digitale Zugang, sowohl physischer Art als auch die Nutzungsfähigkeit, sind räumlich und sozial häufig ungleich verteilt ist (Hoffmann 2020; Pham und Massey 2018; Thonipara et al. 2020). Bundesländer und Kommunen unterscheiden sich bzgl. ihrer politisch-institutionellen Rahmenbedingungen und Ziele, ihrer finanziellen und personellen Ressourcen, ihrer digitalen Kompetenzen und Voraussetzungen für gesellschaftliche Partizipation (Leitner 2018). Kontextuelle Unterschiede, sowohl beim Einsatz als auch bei der Nutzung digitaler Tools in partizipativen Entscheidungsprozessen, müssen somit umfassender betrachtet werden, um strukturelle Barrieren zu identifizieren und Lösungsansätze für einen

erfolgreichen Einsatz digitaler Tools zu entwickeln. Im Hinblick auf Cyberkriminalität und Datensicherheit betont Leitner (2018) zudem, dass Aspekte der Sicherheit und Privatsphäre in der Entwicklung von Systemen für Bürger*innenbeteiligung berücksichtigt werden müssen. Dies ist nötig, um einen geschützten Raum für den Austausch zu ermöglichen, elektronische Identitäten zu sichern und das Vertrauen in den Umgang mit Technologien in der Bevölkerung zu stärken (Leitner 2018). Digitale, insbesondere die sogenannten sozialen Medien können zudem Implikationen für den politischen Diskurs haben. Unhöflichkeit, die Verbreitung von „Fake News“ oder die Herausbildung von „Echokammern“ können ambivalente Auswirkungen auf die politische Partizipation haben. Studien zufolge können „Fake News“ Menschen dazu anregen, sich intensiver in politische Debatten einzubringen, gleichzeitig können Falschinformationen Misstrauen verstärken und sich negativ auf die Qualität von Beteiligungen auswirken (Hoffmann 2020).

Inwieweit und unter welchen kontextuellen Bedingungen die Nutzung digitaler Tools in Partizipationsprozessen Inklusivität und Repräsentativität sowie die Ergebnisqualität von Entscheidungsprozessen tatsächlich fördert und welche Bedeutung dies für Prozessergebnisse im Bereich der Klima- und Energieplanung hat, wurde bisher kaum unter lebensweltlichen Bedingungen untersucht (Deckert et al. 2020; Ruddat und Mayer 2020).

Literaturverzeichnis

- 50,2 online (2020): SMGW von Theben: Virtuelles Bürgerkraftwerk erprobt Strom-Community für Endkunden. 12. Februar. Website: <https://www.50komma2.de/?p=13378> (Zugriff: 26. Januar 2022).
- Aagaard, Annabeth, Hrsg. (2019): *Digital Business Models: Driving Transformation and Innovation*. Cham: Springer International Publishing. <http://link.springer.com/10.1007/978-3-319-96902-2>.
- Alizadeh, Mohammed I., Mohsen Parsa Moghaddam, Nima Amjady, Pierluigi Siano und Mohammed K. Sheikh-El-Eslami (2016): Flexibility in future power systems with high renewable penetration: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 57: 1186–1193.
- Andoni, Merlinda, Valentin Robu, David Flynn, Simone Abram, Dale Geach, David Jenkins, Peter McCallum und Andrew Peacock (2019): Blockchain technology in the energy sector: A systematic review of challenges and opportunities. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 100 (Februar): 143–174.
- Aretz, Astrid, Mark Bost, Bernd Hirschl, Mariela Tapia, Max Sprengler und Stefan Gößling-Reisemann (2017): Fundamentale Resilienzstrategien für die Stromversorgung erforderlich. *Ökologisches Wirtschaften* 32, Nr. 4/2017: 22–24.
- Arnstein, Sherry R. (1969): A Ladder Of Citizen Participation. *Journal of the American Institute of Planners* 35, Nr. 4 (Juli): 216–224.
- Avacon Netz (2022): Das Verteilnetz für Energiegemeinschaften von Morgen – Energieplattform Twistring.
- Bär, Dorothee (2018): Digitale Transformation und gesellschaftliche Teilhabe. In: *Digitalisierung im Spannungsfeld von Politik, Wirtschaft, Wissenschaft und Recht*, hg. v. Christian Bär, Thomas Grädler, und Robert Mayr, S. 1–10. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg. http://link.springer.com/10.1007/978-3-662-55720-4_1.
- Bauknecht, Dierk, Moritz Vogel und Moritz Funcke (2015): Energiewende – Zentral oder dezentral? Diskussionspapier im Rahmen der Wissenschaftlichen Koordination des BMBF Förderprogramms: „Umwelt- und Gesellschaftsverträgliche Transformation des Energiesystems“. Freiburg im Breisgau.
- Baums, Ansgar (2015): Analyse. Was sind digitale Plattformen? <http://plattform-maerkte.de/wp-content/uploads/2015/10/Kompendium-I40-Analyserahmen.pdf> (Zugriff: 20. April 2022).
- Bauwens, Thomas (2017): Polycentric Governance Approaches for a Low-Carbon Transition: The Roles of Community-Based Energy Initiatives in Enhancing the Resilience of Future Energy Systems. In: *Complex Systems and Social Practices in Energy Transitions*, hg. v. Nicola Labanca, S. 119–145. Green Energy and Technology. Cham: Springer International Publishing. http://link.springer.com/10.1007/978-3-319-33753-1_6.
- BDEW [Bundesverband der Energie- und Wasserwirtschaft e. V.] (2016): Die digitale Energiewirtschaft. https://www.bdew.de/documents/28/BDEW_Digitale-Energiewirtschaft_Online.pdf (Zugriff: 20. April 2022).
- BDEW [Bundesverband der Energie- und Wasserwirtschaft e.V.] (2017a): Digitalisierung aus Kundensicht. Berlin.
- BDEW [Bundesverband der Energie- und Wasserwirtschaft e.V.] (2017b): Blockchain in der Energiewirtschaft. Potenziale für Energieversorger. Berlin: BDEW.

- BDEW [Bundesverband der Energie- und Wasserwirtschaft e. V.] (2020): Künstliche Intelligenz für die Energiewirtschaft. https://www.bdew.de/media/documents/BDEW_KI_LAUNCH_2406_1ADiAzP.pdf (Zugriff: 17. März 2022).
- BDEW, VSE, Imp3rove und Kearney (2021): Digital@EVU 2021 — Wie ist der Stand der digitalen Transformation in der Energiewirtschaft? https://www.bdew.de/media/documents/DigitalEVU_2021_-_Stand_der_digitalen_Transformation_in_der_Energiewirtschaft_vF.pdf (Zugriff: 17. März 2022).
- Bengler, Klaus und Martin Schmauder (2016): Digitalisierung. *Zeitschrift für Arbeitswissenschaft* 70, Nr. 2 (August): 75–76.
- Blank-Babazadeh, Marita, Marius Buchmann, Jochen Kreusel, Jannika Mattes, Christoph Mayer, Mathias Dalheimer, Wolfgang Kröger, Ellen Matthies, Gert Brunekreeft, Volker Distelrath, et al. (2021): Resilienz digitalisierter Energiesysteme – Blackout-Risiken verstehen, Stromversorgung sicher gestalten. Schriftenreihe Energiesysteme der Zukunft. München, Halle, Mainz. <https://www.acatech.de/publikation/rde-analyse/download-pdf?lang=de> (Zugriff: 26. April 2021).
- Blasch, Julia, Nicolien M. van der Grijp, Daniel Petrovics, Jenny Palm, Nancy Bocken, Sarah J. Darby, Jacob Barnes, Paula Hansen, Tanja Kamin, Ursa Golob, et al. (2021): New clean energy communities in polycentric settings: Four avenues for future research. *Energy Research & Social Science* 82 (Dezember): 102276.
- BMVI [Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur] (2019): Bericht zum Breitbandatlas Teil 1: Ergebnisse. Berlin. https://www.bmvi.de/SharedDocs/DE/Anlage/DG/Digitales/bericht-zum-breitbandatlas-mitte-2019-ergebnisse.pdf?__blob=publicationFile (Zugriff: 20. April 2022).
- BMWi [Bundesministerium für Wirtschaft und Energie] (2015): Entwurf eines Gesetzes zur Digitalisierung der Energiewende. Intelligente Messsysteme als wichtiger Baustein der Energiewende.
- BMWi [Bundesministerium für Wirtschaft und Energie] (2019): Energieeffizienzstrategie 2050. Dezember. https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Publikationen/Energie/energieeffizienzstrategie-2050.pdf?__blob=publicationFile&v=12.
- Bonn, Heinz-Paul (2018): Die vier Geschwindigkeiten des digitalen Wandels: Wie sich Unternehmen selbst im digitalen Wandel einordnen können. In: *Digitalisierung im Spannungsfeld von Politik, Wirtschaft, Wissenschaft und Recht*, hg. v. Christian Bär, Thomas Grädler, und Robert Mayr, S. 31–37. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg. http://link.springer.com/10.1007/978-3-662-55720-4_4.
- Bordage, Frederic, Lorraine de Montenay, Sofia Benqassem, Julie Delmas-Orgelet, Firmin Domon, Damien Prunel, Caroline Vateau und Etienne Lees Perasso (2021): Digital technologies in Europe: an environmental life cycle approach.
- Borghesi, Simone und Jean-Michel Glachant (2019): Carbon pricing, decarbonisation and digitalisation: the future of and the challenges to the EU climate & energy policy. <https://cadmus.eui.eu/handle/1814/61593> (Zugriff: 22. März 2022).
- Boston College, Robert G. Fichman, Brian L. Dos Santos, University of Louisville, Zhiqiang (Eric) Zheng, und University of Texas at Dallas (2014): Digital Innovation as a Fundamental and Powerful Concept in the Information Systems Curriculum. *MIS Quarterly* 38, Nr. 2 (2. Februar): 329–343.
- Bui, Nicola, Angelo P. Castellani und Michele Zorzi (2012): The Internet of Energy: A Web-Enabled Smart Grid System. *IEEE Network* 26, Nr. 4 (Juli): 39–45.

- Bundestag (2016): Gesetz zur Digitalisierung der Energiewende. https://www.bmwk.de/Redaktion/DE/Downloads/Gesetz/gesetz-zur-digitalisierung-der-energiewende.pdf?__blob=publicationFile&v=4 (Zugriff: 28. April 2022).
- Bürgerrat Klima (2022): Deutschland, lass' uns reden: über das Klima. Website: <https://buergerrat-klima.de/> (Zugriff: 14. April 2022).
- Castagneto Gisse, Giorgio, Dina Subkhankulova, Paul E. Dodds und Mark Barrett (2019): Value of energy storage aggregation to the electricity system. *Energy Policy* 128: 685–696.
- Christof, Florian (2021): Vier Jahre Energiegemeinschaft: Wien Energie zieht Bilanz. 3. Dezember. Website: <https://futurezone.at/science/energiegemeinschaft-wien-energie-bilanz-energiewende-blockchain-nachhaltigkeit-solarstrom/401827261> (Zugriff: 26. Januar 2022).
- Clauß, Thomas (2017): Measuring business model innovation: conceptualization, scale development, and proof of performance: Measuring business model innovation. *R&D Management* 47, Nr. 3 (Juni): 385–403.
- Clauß, Thomas und Sven M. Laudien (2017): Digitale Geschäftsmodelle: Systematisierung und Gestaltungsoptionen. *WiSt - Wirtschaftswissenschaftliches Studium* 46, Nr. 10: 4–10.
- Coneva (2020): coneva in der Praxis: EWS Schönau. 26. November. Website: <https://coneva.com/blog/detail/coneva-in-der-praxis-ews-schoenau/> (Zugriff: 26. Januar 2022).
- ContextCrew (2019): Regionalstrom auf Blockchain-Basis: WSW rollen „Tal.Markt“ bundesweit aus. Februar. Website: <https://www.contextcrew.de/regionalstrom-auf-blockchain-basis-wsw-rollen-tal-markt-bundesweit-aus/> (Zugriff: 26. Januar 2022).
- Coroama, Vlad (2021): Investigating the Inconsistencies among Energy and Energy Intensity Estimates of the Internet – Metrics and Harmonising Values. Bern. <https://www.aramis.admin.ch/Default?DocumentID=67656&Load=true> (Zugriff: 9. März 2022).
- Corusa, Andreas, Georg Erdmann, Elena Timofeeva, Johannes Norbert Predel, Falk Ritschel, Christian Sprengel, Anne Walther, Daniel Kaufmann, Stefan Brühl und Victor Stocker (2021): *Digitalisierung in der Energiewirtschaft*. Berlin: Technische Universität Berlin.
- Deckert, Anna, Fabian Dembski, Frank Ulmer, Michael Ruddat und Uwe Wössner (2020): Digital tools in stakeholder participation for the German Energy Transition. Can digital tools improve participation and its outcome? In: *The Role of Public Participation in Energy Transitions*, S. 161–177. Elsevier. <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/B978012819515400009X>.
- Di Silvestre, Maria Luisa, Salvatore Favuzza, Eleonora Riva Sanseverino und Gaetano Zizzo (2018): How Decarbonization, Digitalization and Decentralization are changing key power infrastructures. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 93 (Oktober): 483–498.
- Doleski, Oliver D., Hrsg. (2017): *Herausforderung Utility 4.0: wie sich die Energiewirtschaft im Zeitalter der Digitalisierung verändert*. Wiesbaden: Springer Vieweg.
- Duch-Brown, Néstor und Fiammetta Rossetti (2020): Digital platforms across the European regional energy markets. *Energy Policy* 144 (September): 111612.

- Energieagentur Ebersberg-München (2022): Windenergie in unserer Region: Windenergie in den Landkreisen Ebersberg und München. Website: <https://www.windenergie-landkreis-muenchen.de/> (Zugriff: 18. April 2022).
- Entega Plus (2020): Selbst erzeugten Solarstrom clever zwischenspeichern. Der Entega Quartierspeicher in Gross-Umstadt macht es möglich. <https://www.entega.ag/fileadmin/downloads/quartierspeicher/ENTEGA-Quartierspeicher-komplett.pdf> (Zugriff: 26. Januar 2022).
- EU [Europäische Union] (2018): *Richtlinie (EU) 2018/2001 des Europäischen Parlaments und des Rates vom 11. Dezember 2018 zur Förderung der Nutzung von Energie aus erneuerbaren Quellen.*
- EU [Europäische Union] (2019): *Richtlinie (EU) 2019/944 des Europäischen Parlaments und des Rates vom 5. Juni 2019 mit gemeinsamen Vorschriften für den Elektrizitätsbinnenmarkt und zur Änderung der Richtlinie 2012/27/EU.*
- Eueco, Hrsg. (2021): Finanzielle Bürgerbeteiligung an Erneuerbaren Energien. Leitfaden für Kommunen, Regionen und KlimaschutzmanagerInnen.
- EWS Schönau (2022): Das EWS Modellprojekt – Reallabor der Bürgerenergie. Website: <https://www.ews-schoenau.de/ews/energieleistungen/modellprojekt/> (Zugriff: 26. Januar 2022).
- Fiukowski, Judith, Berit Müller und Elisa Förster (2019): Empowerment im Beteiligungsprozess der Energiewende. In: *Akzeptanz und politische Partizipation in der Energietransformation.*, hg. v. Cornelia Fraune, Michéle Knodt, Sebastian Gölz, und Katharina Langer, S. 377–393. Wiesbaden: Springer VS. https://doi.org/10.1007/978-3-658-24760-7_17.
- Flacke, Johannes und Cheryl De Boer (2016): An interactive GIS-tool for collaborative local renewable energy planning. https://agile-online.org/conference_paper/cds/agile_2016/shortpapers/130_Paper_in_PDF.pdf (Zugriff: 20. April 2022).
- Fleischle, Frank, Mathias Kaniut, Maximilian Geißler und Sandra Winnik (2021): Barometer Digitalisierung der Energiewende. Modernisierungs- und Fortschrittsbarometer zum Grad der Digitalisierung der leitungsgebundenen Energiewirtschaft. Ernst & Young GmbH Wirtschaftsprüfungsgesellschaft (EY). https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Publikationen/Studien/barometer-digitalisierung-der-energie-wende-berichts-jahr-2020.pdf?__blob=publicationFile&v=20 (Zugriff: 22. März 2022).
- Fraunhofer ISE [Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme] (2020): Baustart für Smartes Quartier Karlsruhe-Durlach: Wärmepumpen und Photovoltaik halbieren CO₂-Emissionen in Bestandsgebäuden. https://www.ise.fraunhofer.de/content/dam/ise/de/documents/presseinformationen/2020/1220_ISE_d_PI_Smartes_Quartier_Durlach.pdf (Zugriff: 20. April 2022).
- Frick, Vivian und Thao-Nhi Nguyen (2021): Energieeinsparung, Sicherheit, Technikbegeisterung und Konsumismus. Eine motivbasierte Typologisierung von Smart-Home-NutzerInnen in Deutschland 25, Nr. 1: 19–42.
- Gähns, Swantje, Astrid Aretz, Friederike Rohde und Hendrik Zimmermann (2021a): Transforming the energy system. Digitalizing the Energy System in a Sustainable Way. *Ökologisches Wirtschaften* 36, Nr. 01. Digitalisation and Sustainability (24. Februar): 28–32.
- Gähns, Swantje, Hannes Bluhm, Elisa Dunkelberg, Jannes Katner, Julika Weiß, Peter Henning, Laurenz Herrmann und Matthias Knauff (2021b): Potenziale der Digitalisierung für die Minderung von Treibhausgasemissionen im Energiebereich. *Climate Change* 74/2021. Berlin: Umweltbundesamt.

- <https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/potenziale-der-digitalisierung-fuer-die-minderung> (Zugriff: 13. Januar 2022).
- Galvin, Ray, Elisabeth Dütschke und Julika Weiß (2021): A conceptual framework for understanding rebound effects with renewable electricity: A new challenge for decarbonizing the electricity sector. *Renewable Energy* 176: 423–432.
- Galvin, Ray, Johannes Schuler, Ayse Tugba Atasoy, Hendrik Schmitz, Matthias Pfaff und Jan Kegel (2022): A health research interdisciplinary approach for energy studies: Confirming substantial rebound effects among solar photovoltaic households in Germany. *Energy Research & Social Science* 86.
- Giehl, Johannes Felipe, Hayri Göcke, Benjamin Grosse, Johannes Kochems, Flora v. Mikulicz-Radecki und Joachim Müller-Kirchenbauer (2019a): Data Documentation Vollaufnahme und Klassifikation von Geschäftsmodellen der Energiewende (27. Oktober). <https://zenodo.org/record/3518997> (Zugriff: 7. Mai 2020).
- Giehl, Johannes Felipe, Hayri Göcke, Benjamin Grosse, Johannes Kochems und Joachim Müller-Kirchenbauer (2019b): Vollaufnahme und Klassifikation von Geschäftsmodellen der Energiewende (6. Februar). <https://zenodo.org/record/2620264> (Zugriff: 7. Mai 2020).
- Giehl, Johannes, Hayri Göcke, Benjamin Grosse, Johannes Kochems und Joachim Müller-Kirchenbauer (2020): Survey and Classification of Business Models for the Energy Transformation. *Energies* 13, Nr. 11 (10. Juni): 2981.
- Glennung, Kirsten, Katarzyna Zawadzka, Natnael Kidane, Padraic McKeever, Benjamin Peters, Navreet Dult, Stavroula Tzioka, Eleni Daridou, Dimitris Stratogiannis, Gabriele Fedele, et al. (2020): General functional requirements and specifications of joint activities in the demonstrators. https://platone-h2020.eu/data/deliverables/864300_M12_D1.1.pdf (Zugriff: 26. Januar 2022).
- Götz, Werner (2020): Eine Reise ins Jahr 2050. In: *Smart City – Made in Germany*, hg. v. Chirine Etezzadeh, S. 283–290. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden. http://link.springer.com/10.1007/978-3-658-27232-6_32.
- van der Grijp, Nicolien, Daniel Petrovics, James Roscoe, Jacob Barnes und Julia Blasch (2019): Theoretical framework focusing on learning in polycentric settings. Deliverable. https://www.newcomersh2020.eu/upload/files/D2_1_newcomers_theoretical_framework_DEF.pdf (Zugriff: 13. Oktober 2020).
- Gui, Emi Minghui und Iain MacGill (2018): Typology of future clean energy communities: An exploratory structure, opportunities, and challenges. *Energy Research & Social Science* 35 (Januar): 94–107.
- Gün, Ahmet, Yüksel Demir und Burak Pak (2020): Urban design empowerment through ICT-based platforms in Europe. *International Journal of Urban Sciences* 24, Nr. 2: 189–215.
- Gungor, Vehbi C., Dilan Sahin, Taskin Kocak, Salih Ergut, Concettina Buccella, Carlo Cecati und Gerhard P. Hancke (2011): Smart Grid Technologies: Communication Technologies and Standards. *IEEE Transactions on Industrial Informatics* 7, Nr. 4 (November): 529–539.
- Hages, Larissa, Christoph Oslislo, Clemens Recker und Steffen J. Roth (2017): Digitalisierung, Lock-in-Effekte und Preisdifferenzierung. Otto-Wolff-Discussion Paper. Köln: Otto-Wolff-Institut für Wirtschaftsordnung (owiwo). <http://hdl.handle.net/10419/201596> (Zugriff: 20. April 2022).

- Hannan, Mahammad A., Mohammad Faisal, Pin Jern Ker, Looe Hui Mun, Khadija Parvin, Teuku Meurah Indra Mahlia und Frede Blaabjerg (2018): A Review of Internet of Energy Based Building Energy Management Systems: Issues and Recommendations. *IEEE Access* 6: 38997–39014.
- Hasler, Stéphanie, Jérôme Chenal und Marc Soutter (2017): Digital Tools as a Means to Foster Inclusive, Data-informed Urban Planning. *Civil Engineering and Architecture* 5, Nr. 6 (Dezember): 230–239.
- Heinemann, Christoph, Dierk Bauknecht und Joß Florian Bracker (2019): Chancen und Risiken der Digitalisierung für eine nachhaltige Energiewirtschaft–Am Beispiel von neuen Handlungsoptionen für Markt und Netz. *Öko-Institut Working Paper*, Nr. 5/2019. <https://www.oeko.de/fileadmin/oekodoc/WP-Digitalisierung-Energiewirtschaft.pdf> (Zugriff: 22. März 2022).
- Henning, Hans-Martin (2018): Digitalisierung und Energiesystemtransformation - Chancen und Herausforderungen: 6.
- Hirschl, Bernd, Astrid Aretz, Mark Bost, Mariela Tapiela und Stefan Gößling-Reisemann (2018): Vulnerabilität und Resilienz des digitalen Stromsystems. Endbericht des Projekts „Strom-Resilienz“. Berlin, Bremen: Institut für Ökologische Wirtschaftsforschung (IÖW) und Universität Bremen, Fachgebiet Resiliente Energiesysteme. https://www.strom-resilienz.de/data/stromresilienz/user_upload/Daten/Schlussbericht_Strom-Resilienz.pdf (Zugriff: 10. September 2018).
- Hoffmann, Christian Pieter (2020): „Digital Divide“ und „Gamification“. Chancen, Formen und Grenzen der digitalen Partizipation. In: *Partizipation für alle und alles?*, hg. v. Astrid Lorenz, Christian Pieter Hoffmann, und Uwe Hirschfeld, S. 383–405. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden. http://link.springer.com/10.1007/978-3-658-27898-4_21.
- Holstenkamp, Lars, Franziska Kahla und Heinrich Degenhart (2018): Finanzwirtschaftliche Annäherungen an das Phänomen Bürgerbeteiligung. In: *Handbuch Energiewende und Partizipation*, hg. v. Lars Holstenkamp und Jörg Radtke, S. 281–301. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden. https://doi.org/10.1007/978-3-658-09416-4_17.
- Holstenkamp, Lars und Jörg Radtke, Hrsg. (2018): *Handbuch Energiewende und Partizipation*. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden. <http://link.springer.com/10.1007/978-3-658-09416-4>.
- Horstink, Lanka, Julia M. Wittmayer, Kiat Ng, Guilherme Pontes Luz, Esther Marín-González, Swantje Gähns, Inês Campos, Lars Holstenkamp, Sem Oxenaar und Donal Brown (2020): Collective Renewable Energy Prosumers and the Promises of the Energy Union: Taking Stock. *Energies* 13 (Januar): 421.
- iea [International Energy Agency] (2017): Digitalization & Energy. <https://iea.blob.core.windows.net/assets/b1e6600c-4e40-4d9c-809d-1d1724c763d5/DigitalizationandEnergy3.pdf> (Zugriff: 20. April 2019).
- International Federation, IAP2 (2018): IAP2 Spectrum of Public Participation. https://iap2.org.au/wp-content/uploads/2020/01/2018_IAP2_Spectrum.pdf (Zugriff: 20. April 2022).
- IÖW [Institut für ökologische Wirtschaftsforschung] (2022): Das Neubauquartier in Groß-Umstadt. *Esquire – Energiespeicherdienste für smarte Quartiere*. Website: <https://www.esquire-projekt.de/impresum?disableOptIn=1> (Zugriff: 26. Januar 2022).
- Jaradat, Manar, Moath Jarrah, Abdelkader Bouselham, Yaser Jararweh und Mahmoud Al-Ayyoub (2015): The Internet of Energy: Smart Sensor Networks and Big Data Management for Smart Grid. *Procedia Computer Science* 56: 592–597.

- Jiang, Hui, Kun Wang, Yihui Wang, Min Gao und Yan Zhang (2016): Energy big data: A survey. *IEEE Access* 4: 3844–3861.
- Kabalci, Ersan und Yasin Kabalci (2019): *From Smart Grid to Internet of Energy*. London: Elsevier.
- Kasaei, Mohammad Javad, Majid Gandomkar und Javad Nikoukar (2017): Optimal management of renewable energy sources by virtual power plant. *Renewable Energy* 114: 1180–1188.
- Kauling, Stefan, Stefan Taeger, Frank Sondershaus und Philipp Lensing (2021): Frühzeitige Visualisierung in Planungsprozessen – ein Dilemma und mögliche Lösungsansätze durch flexible partizipative Ansätze am Beispiel der Windenergie. In: *Handbuch Methoden Visueller Kommunikation in der Räumlichen Planung*, hg. v. Diedrich Bruns, Boris Stemmer, Daniel Münderlein, und Simone Theile, S. 79–99. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden. https://link.springer.com/10.1007/978-3-658-29862-3_5.
- Klärle, Martina und Ute Langendörfer (2011): Der Wert interaktiver Energiepotenzialanalysen für Bürger am Beispiel des Projekts ERNEUERBAR KOMM! FVEE Forschungsverbund Erneuerbare Energien. http://www.fvee.de/fileadmin/publikationen/Themenhefte/th2011-2/th2011_07_02.pdf (Zugriff: 20. April 2022).
- Kleinans, Reinout, Maarten Van Ham und Jennifer Evans-Cowley (2015): Using Social Media and Mobile Technologies to Foster Engagement and Self-Organization in Participatory Urban Planning and Neighbourhood Governance. *Planning Practice & Research* 30, Nr. 3 (27. Mai): 237–247.
- Klessmann, Jens, Martin G. Löhe und Lena-Sophie Müller (2014): Digitale Teilhabe. Fraunhofer-Institut für Offene Kommunikationssysteme FOKUS. <https://www.oeffentliche-it.de/documents/10181/14412/Digitale+Teilhabe> (Zugriff: 20. April 2022).
- Knodt, Michèle, Cornelia Fraune, Sebastian Golz und Katharina Langer, Hrsg. (2019): *Akzeptanz und politische Partizipation in der Energietransformation: gesellschaftliche Herausforderungen jenseits von Technik und Ressourcenausstattung*. Energietransformation. Wiesbaden [Heidelberg]: Springer VS.
- Kondziella, Hendrik und Thomas Bruckner (2016): Flexibility requirements of renewable energy based electricity systems – a review of research results and methodologies. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 53: 10–22.
- Konstantin, Panos (2013): *Praxisbuch Energiewirtschaft*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg. <http://link.springer.com/10.1007/978-3-642-37265-0>.
- Lämmle, Manuel (2020): Projekt „Smartes Quartier Karlsruhe-Durlach“ – Wärmepumpen für ein energieeffizientes und wirtschaftliches Energiekonzept. Veranstaltung: Berliner Eergietage, 4. Juni, Online. https://www.energietage.de/fileadmin/user_upload/2020/Vortraege/5.05_Laemmler_Smartes_Quartier_Durlach.pdf (Zugriff: 26. Januar 2022).
- Lange, Steffen, Johanna Pohl und Tilman Santarius (2020): Digitalization and energy consumption. Does ICT reduce energy demand? *Ecological Economics* 176 (Oktober): 106760.
- Lange, Steffen und Tilman Santarius (2018): *Smarte grüne Welt? Digitalisierung zwischen Überwachung, Konsum und Nachhaltigkeit*. München: Oekom Verlag.
- Leitner, Maria, Hrsg. (2018): *Digitale Bürgerbeteiligung: Forschung und Praxis, Chancen und Herausforderungen der elektronischen Partizipation*. Wiesbaden: Springer Vieweg.

- Lied, Andreas (2017): Studie zur Digitalisierung der Energiewirtschaft. München: Becker Büttner Held Consulting AG.
- Löbbe, Sabine und André Hackbarth (2017): Geschäftsmodelle in der Energiewirtschaft: Ein Kompendium von der Methodik bis zur Anwendung (18. Mai). <https://publikationen.uni-tuebingen.de/xmlui/handle/10900/76311> (Zugriff: 7. Mai 2020).
- Loock, Moritz (2020): Unlocking the value of digitalization for the European energy transition: A typology of innovative business models. *Energy Research & Social Science* 69 (November): 101740.
- Lucha, Christine und Lisa Meinecke (2019): Alte Energiewelt – Neue Energiewelt – Trends und Akteure in einem zunehmend digitalen Energiesystem. https://www.boell.org/sites/default/files/boll.brief_go9_alte_energiewelt_neue_energiewelt.pdf (Zugriff: 20. April 2022).
- Maier, Magnus (2018): Metaanalyse: Digitalisierung der Energiewende. Forschungsradar Energiewende. Berlin: Agentur für Erneuerbare Energien e.V. http://www.forschungsradar.de/fileadmin/content/bilder/Vergleichsgrafiken/meta_digitalisierung_aug18/AEE_Metanalyse_Digitalisierung_aug18.pdf (Zugriff: 20. April 2019).
- Mega, Voula P. (2019): The Paths to Decarbonisation Through Cities and Seas. In: *Eco-Responsible Cities and the Global Ocean*, S. 121–166. Cham: Springer International Publishing. http://link.springer.com/10.1007/978-3-319-93680-2_4.
- Mekonnen, Addisu D. und Pece V. Gorsevski (2015): A web-based participatory GIS (PGIS) for offshore wind farm suitability within Lake Erie, Ohio. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 41 (Januar): 162–177.
- Mlinarič, Maša, Nina Kovač, Jacob Barnes und Nancy Bocken (2019): Typology of new clean energy communities. Deliverable. https://www.newcomersh2020.eu/upload/files/D2_2_newcomers_typology_of_new_clean_energy_communities_DEF.pdf (Zugriff: 13. Oktober 2020).
- Moroni, Stefano, Valentina Alberti, Valentina Antonucci und Adriano Bisello (2019a): Energy communities in the transition to a low-carbon future: A taxonomical approach and some policy dilemmas. *Journal of Environmental Management* 236 (April): 45–53.
- Moroni, Stefano, Valentina Antonucci und Adriano Bisello (2019b): Local Energy Communities and Distributed Generation: Contrasting Perspectives, and Inevitable Policy Trade-Offs, beyond the Apparent Global Consensus. *Sustainability* (Juni).
- Moshövel, Janina, Dirk Magnor, Dirk Uwe Sauer, Swantje Gährs, Mark Bost, Bernd Hirschl, Moritz Cramer, Baris Özalay, Claas Matrose, Christoph Müller, et al. (2015): Analyse des wirtschaftlichen, technischen und ökologischen Nutzens von PV-Speichern. Ergebnisbericht. Gemeinsamer Ergebnisbericht für das Projekt PV -Nutzen. Berlin: ISEA, IÖW, IFHT. https://www.ioew.de/fileadmin/user_upload/BILDER_und_Downloaddateien/Publikationen/2015/PV-Nutzen_Verbund-Schlussbericht.pdf. (Zugriff: 1. Februar 2021).
- Motlagh, Naser Hossein, Mahsa Mohammadrezaei, Julian Hunt und Behnam Zakeri (2020): Internet of Things (IoT) and the Energy Sector. *Energies* 13, Nr. 2: 494.
- Mukhtarov, Farhad, Carel Dieperink und Peter Driessen (2018): The influence of information and communication technologies on public participation in urban water governance: A review of place-based research. *Environmental Science & Policy* 89 (November): 430–438.

- Münster, Sander, Christopher Georgi, Katrina Heijne, Kevin Klamert, Jörg Rainer Noennig, Matthias Pump, Benjamin Stelzle und Han van der Meer (2017): How to involve inhabitants in urban design planning by using digital tools? An overview on a state of the art, key challenges and promising approaches. *Procedia Computer Science* 112: 2391–2405.
- Nefedov, Evgeny, Seppo Sierla und Valeriy Vyatkin (2018): Internet of Energy Approach for Sustainable Use of Electric Vehicles as Energy Storage of Prosumer Buildings. *Energies* 11: 2165.
- Newig, Jens, Ana Adzersen, Edward Challies, Oliver Fritsch und Nicolas Jager (2013): Comparative Analysis of Public Environmental Decision-Making Processes – A Variable-Based Analytical Scheme. *SSRN Electronic Journal*. <http://www.ssrn.com/abstract=2245518> (Zugriff: 30. April 2021).
- O A [Bitkom e.V. & Deutsches Forschungszentrum für Künstliche Intelligenz GmbH] (2017): Künstliche Intelligenz - Wirtschaftliche Bedeutung, gesellschaftliche Herausforderungen, menschliche Verantwortung. https://www.dfki.de/fileadmin/user_upload/import/9744_171012-KI-Gipfelpapier-online.pdf (Zugriff: 20. April 2022).
- O A [Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit] (2019): Klimaschutzprogramm 2030 der Bundesregierung zur Umsetzung des Klimaschutzplans 2050. <https://www.bundesregierung.de/resource/blob/975226/1679914/e01d6bd855f09bf05cf7498e06d0a3ff/2019-10-09-klimamassnahmen-data.pdf> (Zugriff: 12. März 2021).
- O'Dwyer, Edward, Indranil Pan, Salvador Acha und Nilay Shah (2019): Smart energy systems for sustainable smart cities: Current developments, trends and future directions. *Applied Energy* 237 (März): 581–597.
- OEP Community [Open Energy Platform Community] (2022): Open Energy Platform. Website: <https://open-energy-platform.org/> (Zugriff: 18. April 2022).
- OFFIS e. V. (2021): Energetisches Nachbarschaftsquartier Fliegerhorst Oldenburg. *Enaq Fliegerhorst*. Website: <https://www.enaq-fliegerhorst.de/> (Zugriff: 11. Februar 2022).
- OFFIS e. V. (2022): Changing the Game – Neighbourhood Edition – Lernspiel über die Energiewende in Quartieren. Website: <https://www.enaq-fliegerhorst.de/produkt/changingthegame/> (Zugriff: 20. April 2022).
- Onile, Abiodun E., Ram Machlev, Eduard Petlenkov, Yoash Levron und Juri Belikov (2021): Uses of the digital twins concept for energy services, intelligent recommendation systems, and demand side management: A review. *Energy Reports* 7 (November): 997–1015.
- Osterwalder, Alexander und Yves Pigneur (2010): *Business model generation: a handbook for visionaries, game changers, and challengers*. Hoboken, NJ: Wiley.
- Osterwalder, Alexander und Yves Pigneur, Hrsg. (2011): *Business model generation: ein Handbuch für Visionäre, Spielveränderer und Herausforderer; [entwickelt in Zusammenarbeit mit 470 überwältigenden Profis aus 45 Ländern]*. Frankfurt am Main: Campus.
- Palla, Dorothee (2018): Sonnen nutzt Blockchain-Technologie für Stromspeicherung in „Flex-Plattform“. 4. Mai. Website: <https://www.contextcrew.de/sonnen-nutzt-blockchain-technologie-fuer-stromspeicherung-in-flex-plattform/> (Zugriff: 26. Januar 2022).

- Palla, Dorothee (2020): Sonnen nimmt weiteres virtuelles Kraftwerk in Betrieb. 13. März. Website: <https://www.contextcrew.de/sonnen-nimmt-weiteres-virtuelles-kraftwerk-in-betrieb/> (Zugriff: 26. Januar 2022).
- Palm, Jenny (2021): Energy communities in different national settings – barriers, enablers and best practices. https://www.newcomersh2020.eu/upload/files/Deliverable%203_3_%20Energy%20communities%20in%20different%20national%20settings_barriers%2C%20enablers%20and%20best%20practices.pdf (Zugriff: 22. März 2022).
- Petermann, David (2020): Vorstellung Quartier „Am Umstädter Bruch“. Veranstaltung: Energiekonzepte mit Quartierspeichern: Handlungsmöglichkeiten für Kommunen, 1. April, Online. https://www.esquire-projekt.de/fileadmin/esquire/Dateien/Pr%C3%A4sentation_David_Petermann.pdf (Zugriff: 26. Januar 2022).
- Pham, Long und Beth Massey (2018): Effective Digital Participation. In: *Digital Participation through Social Living Labs*, S. 315–332. Elsevier. <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/B9780081020593000174>.
- Pilkington, Marc (2016): Blockchain Technology: Principles and Applications. Hg. v. F. Xavier Olleros und Majlinda Zhegu. *Research Handbook on Digital Transformations*: 225–253.
- Pohl, Johanna, Lorenz M. Hilty und Matthias Finkbeiner (2019): How LCA contributes to the environmental assessment of higher order effects of ICT application: A review of different approaches. *Journal of Cleaner Production* 219 (Mai): 698–712.
- Preiß, Stefan (2017): Blockchain zur Netzstabilisierung: Tennet nutzt erstmals Heimspeicher für Redispatch. 3. November. Website: <https://www.contextcrew.de/blockchain-zur-netzstabilisierung-tennet-nutzt-erstmal-heimspeicher-fuer-redispatch/> (Zugriff: 26. Januar 2022).
- Preiß, Stefan (2020): Sonnen vernetzt Kleinanlagen bis 25 kW über das Internet zu virtuellem Kraftwerk. 9. April. Website: <https://www.contextcrew.de/sonnen-vernetzt-kleinanlagen-bis-25-kw-ueber-das-internet-zu-virtuellem-kraftwerk/> (Zugriff: 26. Januar 2022).
- Rana, Masud (2017): Architecture of the Internet of Energy Network: An Application to Smart Grid Communications. *IEEE Access* 5 (April): 4704–4710.
- Rehtanz, Christian (2015): Energie 4.0 – Die Zukunft des elektrischen Energiesystems durch Digitalisierung. *Informatik-Spektrum* 38, Nr. 1 (Februar): 16–21.
- Rhodes, Aidan (2020): Digitalisation of Energy: An Energy Futures Lab Briefing Paper. Energy Futures Lab.
- Richard, Philipp und Lukas Vogel (2017): Digitalisierung als Enabler für die Steigerung der Energieeffizienz: Eine Analyse digitaler Energiedienstleistungen sowie Handlungsempfehlungen zur verstärkten Nutzung ihrer Potenziale. Deutsche Energie-Agentur GmbH (dena). https://www.dena.de/fileadmin/dena/Dokumente/Pdf/9228_dena-Analyse_Digitalisierung_Enabler_Steigerung_Energieeffizienz.pdf (Zugriff: 20. April 2022).
- Rieger, Volker und Sven Weber (2017): Energiewende 4.0 – Chancen, Erfolgsfaktoren, Herausforderungen, Barrieren für Stadtwerke und Verteilnetzbetreiber. In: *Herausforderung Utility 4.0*, hg. v. Oliver D. Doleski, S. 181–197. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden. http://link.springer.com/10.1007/978-3-658-15737-1_10.

- Romanov, Dmitry und Stefan Holler (2021): District heating systems modeling: A gamification approach. *Energy Reports* 7 (Oktober): 491–498.
- Roth, Ines (2018): Digitalisierung in der Energiewirtschaft. Technologische Trends und ihre Auswirkungen auf Arbeit und Qualifizierung. Working Paper Forschungsförderung. Hans-Böckler-Stiftung.
- Ruddat, Michael und Vivienne Mayer (2020): Wie beteiligen? Die Sicht der Verwaltung auf kommunale Partizipationsprozesse anhand von Fallbeispielen in Herrenberg und Stuttgart. <http://elib.uni-stuttgart.de/handle/11682/10856> (Zugriff: 30. April 2021).
- Rudolph, Steffen (2019): *Digitale Medien, Partizipation und Ungleichheit: eine Studie zum sozialen Gebrauch des Internets*. Research (Wiesbaden, Germany). Wiesbaden: Springer VS.
- Schallmo, Daniel R. A. (2018): *Geschäftsmodelle erfolgreich entwickeln und implementieren: Mit Aufgaben, Kontrollfragen und Templates*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg. <http://link.springer.com/10.1007/978-3-662-57605-2>.
- Schallmo, Daniel R. A., Volker Herbolt und Oliver D. Doleski (2017): *Roadmap Utility 4.0: Strukturiertes Vorgehen für die digitale Transformation in der Energiewirtschaft*. essentials. Wiesbaden s.l.: Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH.
- Schiebe, Christoph (2020): Partizipation & Pandemie – Handreichung zu kontaktlosen Beteiligungsmethoden. Hg. v. Senatsverwaltung für Stadtentwicklung und Wohnen.
- Schinckus, Christophe (2021): Proof-of-work based blockchain technology and Anthropocene: An undermined situation? *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 152 (Dezember): 111682.
- Schmidt, Katharina (2021): Europäisches Forschungsprojekt zur Energieversorgung – Der türkisfarbene Rolls-Royce. *kreiszeitung.de*. 30. März. Website: <https://www.kreiszeitung.de/lokales/diepholz/twistringen-ort47316/der-tuerkisfarbene-rolls-royce-90273089.html> (Zugriff: 26. Januar 2022).
- Schnabel, Frieder (2020): Geschäftsmodelle für gemeinschaftlich genutzte Quartierspeicher. Stuttgart. https://www.esquire-projekt.de/fileadmin/esquire/Dateien/Arbeitspapier_Gesch%C3%A4ftsmodelle_f%C3%BCr_Quartierspeicher_Schnabel.pdf (Zugriff: 26. Januar 2022).
- Schönhuth, Michael und Tabea Jerrentrup (2019): *Partizipation und nachhaltige Entwicklung: ein Überblick*. Wiesbaden [Heidelberg]: Springer VS.
- Schoßböck, Judith, Bettina Rinnerbauer und Peter Parycek (2018): Digitale Bürgerbeteiligung und Elektronische Demokratie. In: *Digitale Bürgerbeteiligung*, hg. v. Maria Leitner, S. 11–40. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden. http://link.springer.com/10.1007/978-3-658-21621-4_2.
- Schuitema, Geertje, Lisa Ryan und Claudia Aravena (2017): The Consumer’s Role in Flexible Energy Systems: An Interdisciplinary Approach to Changing Consumers’ Behavior. *IEEE Power and Energy Magazine* 15, Nr. 1: 53–60.
- Seltzer, Ethan und Dillon Mahmoudi (2013): Citizen Participation, Open Innovation, and Crowdsourcing: Challenges and Opportunities for Planning. *Journal of Planning Literature* 28, Nr. 1 (Februar): 3–18.
- Siemens (2020): Siemens Campus Microgrid: ein intelligentes System zur Optimierung des Strom- und Wärmebedarfs. <https://assets.new.siemens.com/siemens/assets/api/uuid:eb12880c-b45f-46d4-b90b-803cbd07a63d/HintergrundInfo-Siemens-Microgrid.pdf> (Zugriff: 26. Januar 2022).

- Sleiti, Ahmad K., Jayanta S. Kapat und Ladislav Vesely (2022): Digital twin in energy industry: Proposed robust digital twin for power plant and other complex capital-intensive large engineering systems. *Energy Reports* 8 (November): 3704–3726.
- Song, Yonghua, Jin Lin, Ming Tang und Shufeng Dong (2017): An Internet of Energy Things Based on Wireless LPWAN. *Engineering* 3, Nr. 4 (August): 460–466.
- Sousa, Tiago, Tiago Soares, Pierre Pinson, Fabio Moret, Thomas Baroche und Etienne Sorin (2019): Peer-to-peer and community-based markets: A comprehensive review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 104 (April): 367–378.
- Soutar, Iain (2021): Dancing with complexity: Making sense of decarbonisation, decentralisation, digitalisation and democratisation. *Energy Research & Social Science* 80 (Oktober): 102230.
- SPD/GRÜNE/FDP (2021): Mehr Fortschritt wagen. Bündnis für Freiheit, Gerechtigkeit und Nachhaltigkeit. Koalitionsvertrag 2021 – 2025 zwischen der Sozialdemokratischen Partei Deutschlands (SPD), BÜNDNIS 90 / DIE GRÜNEN und den Freien Demokraten (FDP). Website: https://www.spd.de/fileadmin/Dokumente/Koalitionsvertrag/Koalitionsvertrag_2021-2025.pdf (Zugriff: 29. März 2022).
- Specht, Jan Martin und Reinhard Madlener (2019): Energy Supplier 2.0: A conceptual business model for energy suppliers aggregating flexible distributed assets and policy issues raised. *Energy Policy* 135 (Dezember): 110911.
- Spieker, Arne (2018): Stakeholder Dialogues and Virtual Reality for the German Stakeholder Dialogues and Virtual Reality for the German Energiewende. *Energiewende*, Nr. 1. <https://scholarship.law.missouri.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=1788&context=jdr> (Zugriff: 20. April 2022).
- Spieker, Arne, Günter Wenzel und Frank Brettschneider (2017): Bauprojekte visualisieren. Leitfaden für die Bürgerbeteiligung. Baden-Württemberg Stiftung gGmbH. https://www.bwstiftung.de/fileadmin/bwstiftung/Publikationen/Forschung/Forschung_Bauprojekte_Visualisieren_Nr._86.pdf (Zugriff: 20. April 2022).
- Stadt Bornheim (2022): Windenergie in Bornheim – Hintergrund, Planung und Beteiligung. Website: <https://www.bornheim.de/windenergie> (Zugriff: 18. April 2022).
- Stadt Dresden (2022): Integriertes Energie- und Klimaschutzkonzept: Ideenfinder – Ideen für den Klimaschutz gesucht. Website: <https://www.dresden.de/de/stadtraum/umwelt/umwelt/klima-und-energie/klimaschutz/klimaschutzkonzept.php> (Zugriff: 14. April 2022).
- Stadt Hamburg (2022): Beteiligungsverfahren Jungfernstieg. Website: <https://beteiligung.hamburg/jungfernstieg/#/> (Zugriff: 18. April 2022).
- Stadt Würzburg (2022): Machen Sie mit! Würzburg braucht Ihre Klimaschutzideen! Website: <https://www.online-beteiligung-wuerzburg.de/> (Zugriff: 18. April 2022).
- Stephens, Jennie C. (2019): Energy Democracy: Redistributing Power to the People Through Renewable Transformation. *Environment: Science and Policy for Sustainable Development* 61, Nr. 2 (4. März): 4–13.
- Strielkowski, Wadim, Dalia Streimikiene, Alena Fomina und Elena Semenova (2019): Internet of Energy (IoE) and High-Renewables Electricity System Market Design. *Energies* 12: 4790.

- Strohmeier, Bernhard und Fabian Reetz (2019): *Smarte Sektorenkopplung, Digitalisierung und Distributed Ledger Technologien*. August.
- Tagliapietra, Simone, Georg Zachmann, Ottmar Edenhofer, Jean-Michel Glachant, Pedro Linares und Andreas Loeschel (2019): The European union energy transition: Key priorities for the next five years. *Energy Policy* 132 (September): 950–954.
- TenneT (2020): Westküstenleitung Veranstaltung. *TenneT*. Website: <https://www.tennet.eu/de/unser-netz/onshore-projekte-deutschland/westkuestenleitung/event/> (Zugriff: 11. Februar 2022).
- Thasnimol, C. M. und R. Rajathy (2020): The Paradigm Revolution in the Distribution Grid: The Cutting-Edge and Enabling Technologies. *Open Computer Science* 10, Nr. 1: 369–395.
- Thonipara, Anita, Rolf G. Sternberg, Till Proeger und Lukas Haefner (2020): Assessing the Digital Divide and its Regional Determinants: Evidence from a Web-Scraping Analysis. Ifh Working Paper. Göttingen: Volkswirtschaftliches Institut für Mittelstand und Handwerk an der Universität Göttingen (ifh). <http://hdl.handle.net/10419/225985> (Zugriff: 20. April 2022).
- Varela, Ines (2018): Energy Is Essential, but Utilities? Digitalization: What Does It Mean for the Energy Sector? In: *Digital Marketplaces Unleashed*, hg. v. Claudia Linnhoff-Popien, Ralf Schneider, und Michael Zaddach, S. 829–838. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg. http://link.springer.com/10.1007/978-3-662-49275-8_73.
- Veit, Daniel, Eric Clemons, Alexander Benlian, Peter Buxmann, Thomas Hess, Dennis Kundisch, Jan Marco Leimeister, Peter Loos und Martin Spann (2014): Geschäftsmodelle: Eine Forschungsagenda für die Wirtschaftsinformatik. *WIRTSCHAFTSINFORMATIK* 56, Nr. 1 (Februar): 55–64.
- Vortanz, Karsten und Peter Zayer (2017): Smart Meter Rollout: Intelligente Messsysteme als Schnittstelle zum Kunden im Smart Grid und Smart Market. In: *Herausforderung Utility 4.0*, hg. v. Oliver D. Doleski, S. 585–604. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden. http://link.springer.com/10.1007/978-3-658-15737-1_30.
- Wagner, Oliver, Thomas Adisorn, Lena Tholen und Dagmar Kiyar (2020): Surviving the Energy Transition: Development of a Proposal for Evaluating Sustainable Business Models for Incumbents in Germany's Electricity Market. *Energies* 13, Nr. 3 (7. Februar): 730.
- Webb, Molly, Andrew Scott, Ipek Gençsü und Derik Broekhoff (2020): Urban Energy and the Climate Emergency: Achieving Decarbonisation via Decentralisation and Digitalisation: 52.
- Wien Energie (2022): Viertel Zwei: Die erste Energiegemeinschaft Österreichs. Website: <https://positionen.wienenergie.at/projekte/strom/viertel-zwei/> (Zugriff: 26. Januar 2022).
- Witte, Julika, Deutsche Akademie der Technikwissenschaften, Deutsche Akademie der Naturforscher Leopoldina und Union der Deutschen Akademien der Wissenschaften, Hrsg. (2020): *Zentrale und dezentrale Elemente im Energiesystem: der richtige Mix für eine stabile und nachhaltige Versorgung: Stellungnahme*. Schriftenreihe zur wissenschaftsbasierten Politikberatung. Halle (Saale): Deutsche Akademie der Naturforscher Leopoldina e. V. - Nationale Akademie der Wissenschaften.
- Wittmayer, Julia M., Flor Avelino, Bonno Pel und Inês Campos (2021): Contributing to sustainable and just energy systems? The mainstreaming of renewable energy prosumerism within and across institutional logics. *Energy Policy* 149, Nr. 112053 (Februar).

- Wittmayer, Julia M., Inês Campos, Flor Avelino, Donal Brown, Borna Doračić, Maria Fraaije, Swantje Gährs, Arthur Hinsch, Silvia Assalini, Timon Becker, et al. (2022): Thinking, doing, organising: Prefiguring just and sustainable energy systems via collective prosumer ecosystems in Europe. *Energy Research and Social Science* 86.
- WSW Wuppertaler Stadtwerke (2022): Tal.Markt - Sie können zwischen zwei Angeboten wählen. Website: <https://talmarkt.wsw-online.de/productinformation> (Zugriff: 26. Januar 2022).
- Yu, Wei, Panos Patros, Brent Young, Elsa Klinac und Timothy Gordon Walmsley (2022): Energy digital twin technology for industrial energy management: Classification, challenges and future. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 161 (Juni): 112407.
- Zajc, Matej, Mitja Kolenc und Nermin Suljanović (2019): Virtual power plant communication system architecture. In: *Smart Power Distribution Systems*, S. 231–250. Elsevier. <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/B9780128121542000110>.
- Zebralog (2015): Ergebnisbericht: Online-Beteiligung zum Teilflächennutzungsplan Windenergie in Heidelberg. Ergebnisbericht. http://www.nachbarschaftsverband.de/fnp/wind/ergebnisse_beteiligung/Dokumentation%20der%20Onlinebeteiligung%20in%20Heidelberg.pdf (Zugriff: 20. April 2022).
- Zhou, Yue, Jianzhong Wu, Chao Long und Wenlong Ming (2020): State-of-the-Art Analysis and Perspectives for Peer-to-Peer Energy Trading. *Engineering* 6, Nr. 7 (Juli): 739–753.

www.steuerboard-energie.org



SteuerBoard Energie

Steuerungsmechanismen
im polyzentrischen
Energiesystem der Zukunft