



Fraunhofer CINES

Digitalisierung des Energiesystems – 14 Thesen zum Erfolg

Impressum

Thesen zur Digitalisierung des Energiesystems

Projektleitung

Fraunhofer Cluster Integrierte Energiesysteme

EUREF Campus 23 – 24, 10829 Berlin

Wickert, Manuel, manuel.wickert@iee.fraunhofer.de

Verantwortlich für den Inhalt des Textes

Bergsträßer, Jonathan, jonathan.bergstraesser@iee.fraunhofer.de

Gkoktsis, George, george.gkoktsis@sit.fraunhofer.de

Hirsch, Tilo, tilo.hirsch@iosb-ast.fraunhofer.de

Klaiber, Stefan, stefan.klaiber@iosb-ast.fraunhofer.de

Klobasa, Marian, marian.klobasa@isi.fraunhofer.de

Kohrs, Robert, robert.kohrs@ise.fraunhofer.de

Lauer, Hagen, hagen.lauer@sit.fraunhofer.de

Nicolai, Steffen, steffen.nicolai@iosb-ast.fraunhofer.de

Offergeld, Thomas, thomas.offergeld@fit.fraunhofer.de

Rülicke, Linda, linda.ruelicke@iee.fraunhofer.de

Schmidt, Dietrich, dietrich.schmidt@iee.fraunhofer.de

Warweg, Oliver, oliver.warweg@iosb-ast.fraunhofer.de

Welisch, Marijke, marijke.welisch@zv.fraunhofer.de

Wende-von Berg, Sebastian, sebastian.wende-von.berg@iee.fraunhofer.de

Werner, Daniel, daniel.werner@ise.fraunhofer.de

Wickert, Manuel, manuel.wickert@iee.fraunhofer.de

Moderation und Facilitation

Stefan Rötzel, roetzel@sciencepark-kassel.de, Science Park Kassel GmbH

Veröffentlicht

September 2022

Hinweise

Dieser Bericht einschließlich aller seiner Teile ist urheberrechtlich geschützt. Die Informationen wurden nach bestem Wissen und Gewissen unter Beachtung der Grundsätze guter wissenschaftlicher Praxis zusammengestellt. Die Autor:innen gehen davon aus, dass die Angaben in diesem Bericht korrekt, vollständig und aktuell sind, übernehmen jedoch für etwaige Fehler, ausdrücklich oder implizit, keine Gewähr.

Inhaltsverzeichnis

Management Summary	4
1 Einleitung	8
2 Transformation und Trends der Energieversorgung	10
2.1 Energiesicherheit und hohe Energiepreise	11
2.2 Sektorenkopplung im Verkehrsbereich	13
2.3 Transformation der Wärmeversorgung.....	15
2.4 Umbau der Stromnetze	17
2.5 Bereitstellung von Flexibilität.....	19
2.6 Transformation der Akteurslandschaft.....	20
2.7 Nutzerzentrierung und aktive Beteiligung von Anwendenden	21
2.8 Resilienz des Energiesystems	22
3 Trends der Digitalisierung	23
3.1 Datenräume	23
3.2 Internet of Things.....	24
3.3 Cloud Computing	24
3.4 Edge Computing.....	24
3.5 Distributed Ledger Technologies	25
3.6 Quantencomputing.....	25
3.7 Künstliche Intelligenz	26
3.8 Digitale Zwillinge.....	26
3.9 Mobile Vernetzung	27
3.10 Datenschutz und Privacy	27
4 Stand der Digitalisierung des Energiesystems	32
4.1 Datenökonomie	33
4.2 Sektorenkopplung.....	36
4.3 Anlagenkommunikation	39
4.4 Netzbetrieb und -planung	41
4.5 Cybersecurity im Energiesystem.....	43
5 Digitalisierung des Energiesystems – 14 Thesen zum Erfolg	46
5.1 Schwerpunkt Datenökonomie	47
5.2 Schwerpunkt Sektorenkopplung.....	53
5.3 Schwerpunkt Anlagenkommunikation	58
5.4 Schwerpunkt Netzbetrieb und -planung	62
5.5 Schwerpunkt Cybersecurity	67

5.6	Europäische Dimension	71
6	Fazit	72
7	Abbildungsverzeichnis.....	74
8	Literaturverzeichnis	75

Management Summary

Die Digitalisierung verändert alle Bereiche unseres Lebens, unserer Wirtschaft und unserer Gesellschaft. Nicht zuletzt im Energiesystem nehmen digitale Technologien schon seit Jahren eine zentrale Rolle ein – insbesondere im Bereich der erneuerbaren Energien, die aufgrund ihrer Dezentralität und Variabilität ein höheres Maß an Koordination benötigen. Die vorliegende Studie will einen Beitrag zur Weiterentwicklung der Digitalisierung im Energiesystem leisten. Dazu werden im Rahmen der Studie 14 Thesen aufgestellt und deren Implikationen für die Akteure im Energiesystem aufgezeigt. Als Beitrag zur energiepolitischen Diskussion sind aus den Thesen Botschaften an die Politik sowie konkrete Handlungsempfehlungen abgeleitet.

Die Thesen in dieser Studie sind in fünf Schwerpunkte gegliedert, die sich aus einer Analyse der relevantesten Trends der Energiesystemtransformation und der Digitalisierung ergeben. Anhand der identifizierten Schwerpunkte beschreibt die Studie dezidiert den Stand der Digitalisierung des Energiesystems. Diese Schwerpunksetzung erhebt dabei keinen Anspruch auf Vollständigkeit, sondern orientiert sich an der Zielstellung, den Fokus auf kurz- bis mittelfristige Maßnahmen zu legen (bis 2030). Dabei wurden die folgenden Schwerpunkte ausgewählt, die den größten Hebel bieten, um die klimaneutrale Energiewirtschaft mit digitalen Werkzeugen bestmöglich zu etablieren.

Mit rasant steigenden Datenmengen gewinnt das ökonomische Potenzial von Daten immer mehr an Relevanz – die sogenannte **Datenökonomie**. Fortschreitende technische Möglichkeiten zur Messen, zur Speicherung und Analyse von Daten befeuern Geschäftsmodelle, die auf Daten basieren. Der souveräne Umgang mit Daten und die dezentrale Datenspeicherung kann über sogenannte Datenräume dabei weiter gewährleistet werden. Das ermöglicht den Einsatz von innovativen Methoden der künstlichen Intelligenz innerhalb der kritischen Infrastruktur und erlaubt eine enorme Effizienzsteigerung aller energiewirtschaftlichen Prozesse.

Die digitale **Sektorenkopplung** ist ein weiterer relevanter Bereich, in dem die Digitalisierung in der nahen Zukunft an Bedeutung gewinnt. Dabei sind insbesondere Power-to-Mobility, Power-to-Heat und Power-to-Gas/H₂ zu nennen. An diesen Koppelpunkten der Sektoren muss die Digitalisierung eine (noch) stärkere Rolle für die Systemintegration einnehmen, für die die digitalisierte Steuerung von zentraler Relevanz ist.

Essenziell für die Digitalisierung der Energiewirtschaft ist weiterhin die **Anlagenkommunikation**. Dabei sind vorrangig zwei Bereiche interessant. Einmal die technische Ebene, also die Kommunikation von Gerätedaten mit und über das Smart-Meter-Gateway, und zum anderen die regulatorische Ebene zur Kommunikation von Daten zwischen einzelnen Marktakteuren im liberalisierten Energiemarkt.

Diese Form der Kommunikation ist eng verschränkt mit dem zunehmend **digitalisierten Netzbetrieb** – der auch aufgrund der steigenden Komplexität vermehrt eine digitale Netzplanung benötigt. Die Digitalisierung hat in den verschiedenen Netzebenen deutlich an Fahrt aufgenommen und wurde speziell in den Höchst- aber auch Hochspannungsnetzen umgesetzt. Dieser Trend muss in die unteren Spannungsebenen fortgesetzt werden, um das Netz mit Systemdienstleistungen zu unterstützen.

Die **Cybersicherheit** ist der letzte in der Studie adressierte Bereich, der aktuell stark im Fokus des digitalisierten Energiesystems steht. Da die Versorgungssicherheit eine der relevantesten Zielgrößen der Energiepolitik ist, ist eine Betrachtung von Cybersicherheit für ein digitalisiertes Energiesystem unumgänglich. Dabei reicht ein Fokus auf die reine Abwehr von Angriffen für die weitere

Betrachtung nicht aus. Vielmehr muss die Möglichkeit von Störungen und Schwachstellen beim Design von Systemen berücksichtigt werden.

Die Autor:innen der Studie haben für alle Schwerpunktthemen Thesen formuliert, die keine rein nationale Perspektive haben, sondern auch einen Impuls für eine europäische Strategie zur Digitalisierung der Energieversorgung geben sollen. Schwerpunkt der Analyse und der konkreten Handlungsempfehlungen war allerdings die deutsche Regulatorik und Gesetzeslage.

Die folgenden 14 Thesen, abgeleitet vom aktuellen Stand der Digitalisierung des Energiesystems, zeigen das Potenzial und die Hemmnisse einer weitreichenderen Digitalisierung der verschiedenen Sektoren auf. Umfangreiche Bedeutung für die energiewirtschaftlichen Akteure, Botschaften an die Politik, sowie konkrete Handlungsempfehlungen sind in der Studie dezidiert aufgelistet. Hier finden Sie eine Zusammenfassung:

These 1: Der Wert von Energie ist zukünftig abhängig von den verknüpften Daten

Der Marktwert von Energie hängt typischerweise stark von Unsicherheiten ab, die u.a. durch wetterbedingte Einspeisung hervorgerufen werden. Je mehr Daten und Informationen zur Verfügung stehen, desto besser können Unsicherheiten reduziert werden. Neben Unsicherheiten spielt die Herkunft von Energie zunehmend eine wichtige Rolle (grüne Eigenschaft). In beiden Fällen kann Energie mit zusätzlichen Daten wie dem richtigen Management unter Unsicherheiten oder der grünen Eigenschaft an Wert gewinnen.

These 2: Digital getriebene Wertschöpfungsnetzwerke sind die Zukunft des Energiesystems

Effektive, zielorientierte Digitalisierung soll nicht vorhandene Prozesse automatisieren, sondern führt zu einer neuen Prozesslandschaft und wandelt dabei Wertschöpfungsketten in Wertschöpfungsnetzwerke um. Neue Geschäftsmodelle in der Energiewirtschaft müssen konsequent digital gedacht werden und insbesondere die Nutzer:innen aktiv mit einbeziehen.

These 3: Ein souveränes und resilientes europäisches Energiesystem benötigt eine EU-Basis-IKT

Resiliente Energieversorgung in einem digitalisierten Energieversorgungssystem muss auch die Abhängigkeiten, die IKT-Komponenten mit sich bringen, vollständig betrachten. Als Folge müssen diese im ersten Schritt vor allem bei kritischen Prozessen den Akteur:innen transparent werden. Anschließend sollten ggf. identifizierte singuläre Abhängigkeiten entweder gelöst werden, oder alternativ über eine globale Diversifizierung beendet werden. Die Abhängigkeit von Basis-IKT-Komponenten (Hard- und Software) aus Nicht-EU Ländern muss daher abgebaut werden.

These 4: Ohne eine digitalisierte Sektorenkopplung steigen die Kosten der Transformation des Energiesystems erheblich

Die Kopplung der Sektoren bringt eine hohe Komplexität im Energiesystem mit sich. Ohne weitreichende Digitalisierung, insbesondere an den Schnittstellen der einzelnen Sektoren, ist eine Sektorenkopplung ökonomisch nicht tragfähig und damit praktisch nicht umsetzbar.

These 5: Tragfähige energiewirtschaftliche Geschäftsmodelle für eine digitalisierte Sektorenkopplung auf Quartiersebene scheitern derzeit an regulatorischen Hürden

Insbesondere auf Quartiersebene, wo die Kopplung von Wärme, Gas und Strom verstärkt umgesetzt werden muss, können gesamtwirtschaftliche Vorteile (z. B. Reduktion von Spitzenlasten an den Kuppelstellen) von digitalen Geschäftsmodellen nicht monetarisiert werden. Die Regulierung

muss hier angepasst werden, um eine sinnvolle, digitalisierte Sektorenkopplung auf Quartiers-ebene zu ermöglichen.

These 6: Eine effiziente Dekarbonisierung des Wärmesektors ist nur mit Digitalisierung zu erreichen

Die Digitalisierung des Wärmesektors steht - wie die technologische Transformation des Wärmesektors - noch in den Anfängen. Beides muss Hand in Hand passieren, um eine schnelle und effiziente Umsetzung zu ermöglichen. Dabei wird insbesondere bei der verbrauchsseitigen Flexibilisierung ein großes Potenzial gesehen.

These 7: Das intelligente Messsystem wird in der Anlagenkommunikation von anderen Lösungen überholt

Der sogenannte Smart-Meter-Rollout verzögert sich weiter und wird durch mittlerweile etablierte Informationskanäle zu den Anlagen immer weniger werthaltig für die einzelnen Akteur:innen. Hersteller-Clouds sind heutzutage in der Lage eine Vielzahl an Anlagen kommunikationstechnisch zu erreichen. Kooperationen zum Datenaustausch (z. B. zwischen Netzbetreibern und Herstellern) können heute schon große Potenziale bspw. bei der Erschließung von Flexibilitäten in der Breite heben.

These 8: Die Energiewende braucht Anlagenkommunikation basierend auf aktuellen IT-Technologien und offener Dokumentation

Die Vielzahl der Anlagenkommunikation setzt auf Kommunikationsstandards, die in der Anfangszeit der Fernwirktechnik entwickelt wurden und für die keinerlei Weiterentwicklung geplant ist. Insbesondere für neue Energieanlagen sollten moderne IoT-Protokolle genutzt werden, die offen dokumentiert sind.

These 9: Moderne Anlagenkommunikation ist Plug&Play-fähig und ermöglicht akteursübergreifende Prozessautomatisierung

Durch die enorme Menge an Klein- und Kleinstanlagen, die zukünftig aktiv in das Management des Energiesystems einbezogen werden, ist es nicht mehr möglich, Anlagenanbindungen manuell durchzuführen. Eine Automatisierung der Anbindung, des Wechsels z. B. eines Aggregators sowie die Automatisierung aller Prozesse um eine Betriebsbereitschaft sicherzustellen, ist an dieser Stelle notwendig.

These 10: Digitalisierung ist notwendige Kernkompetenz im zukünftigen Stromnetzbetrieb

Digitalisierung wird zunehmend integraler Bestandteil des Stromnetzbetriebs. Netzbetreiber werden daher ihre Digitalisierungskompetenz im Unternehmen aufbauen müssen. Insbesondere für kleinere Netzbetreiber bieten Kooperationsnetzwerke dazu eine Unterstützung. Digitalisierung als reine Dienstleistung zu betrachten, die eingekauft werden kann, verkennet den Impact der Technologie.

These 11: Eine dezentrale Energiewende bedeutet vollständige Digitalisierung bis in die unteren Netzebenen

Der starke Ausbau von Anlagen (dezentrale Erzeugung und neue Verbraucher) in den unteren Netzebenen macht eine aktive digitalisierte Netzbetriebsführung der gesamten Verteilnetze not-

wendig. Dies ermöglicht die Versorgungsqualität und Verfügbarkeit bei einem Umstieg von reinen Verbraucher:innen zu Prosumern sicherzustellen. Gleichzeitig kann dadurch der notwendige Netzausbau zielgerichtet und in einem angemessenen Umfang flankiert werden.

These 12: Die rechtzeitige Umsetzung der Energiewende kann nur durch eine vollständige Digitalisierung von Planungs- und Genehmigungsprozessen gelingen

Der Umbau des Energiesystems erfordert enorme Infrastrukturinvestitionen, die in diversen Planungs- und Genehmigungsverfahren operationalisiert werden. Die Digitalisierung der dahinterliegenden Prozesse und Schnittstellen ist notwendig, damit der ambitionierte Zeitplan genehmigungsrechtlich möglich wird.

These 13: Cyberresilienz wird Cybersecurity ablösen

Die Betrachtung des digitalisierten Energiesystems als eine Infrastruktur, die nur ausreichend geschützt werden muss, greift zu kurz. Vielmehr muss allen Akteur:innen deutlich werden, dass ein vollständiger Schutz bei dieser Komplexität nicht mehr umsetzbar ist. Das digitale Energiesystem der Zukunft muss also in der Lage sein mit Fehlern und Störungen umzugehen.

These 14: Zuverlässige EV-Netze bedürfen zuverlässiger Kommunikationsnetze

Durch die Digitalisierung werden Energienetze und Kommunikationsnetze immer stärker miteinander verknüpft. Dadurch hängt deren Zuverlässigkeit auch direkt voneinander ab. Die Anforderungen an eine zuverlässige Energieversorgung müssen somit auch auf die Kommunikationsinfrastrukturen abgeleitet werden, mit der sie betrieben werden.

Zusammenfassung

Zusammenfassend sind die Autor:innen der Ansicht, dass die Digitalisierung einen zentralen Schlüssel zur Umsetzung der Energiewende darstellt. Ohne eine weitreichende und konsequente Digitalisierung von der Anlagensteuerung, über die gesamte Netzkaskade bis in die einzelnen Sektoren ist eine ökonomische und rechtzeitige Energiewende nicht machbar. Dabei kann eine Datenökonomie der Enabler sein, um die notwendige akteursübergreifende Prozessautomatisierung möglich zu machen. Um die Sicherheit der Energieversorgung dabei weiter zu erhöhen, muss zudem die Cyberresilienz eine relevante Rolle in einer europäischen Digitalisierungsstrategie für die Energieversorgung einnehmen.

1 Einleitung

Digitale Technologien prägen schon heute das Energiesystem – und ihre Rolle wird zukünftig zunehmend an Relevanz gewinnen. Das Potenzial der Digitalisierung im erneuerbaren, dezentralen Energiesystem der Zukunft ist enorm. Damit dieses Potenzial optimal und zeitnah entfaltet werden kann, müssen alle Akteur:innen aus Wirtschaft, Politik, Forschung und Zivilgesellschaft jetzt die passenden Weichen stellen. Relevante Erkenntnisse aus der Forschung müssen dafür gebündelt aufbereitet und in die Umsetzung gebracht werden. Die Fraunhofer-Energieforschung möchte sich im Rahmen dessen zur Digitalisierung der Energiewirtschaft gemeinsam positionieren, um Leitlinien für eine erfolgreiche, nachhaltige, kosteneffiziente und schnelle Umsetzung zu liefern. Dafür wird in der folgenden Studie eine abgestimmte Perspektive mit konkreten Handlungsempfehlungen dargelegt.

Dazu wurden die relevantesten Innovationstreiber für die Digitalisierung der Energiewirtschaft bestimmt, um die Bereiche der Energiewirtschaft sowie die Werkzeuge der Digitalisierung zu etablieren, in denen ein hoher Handlungsbedarf sowie ein großes Optimierungspotenzial durch Digitalisierung besteht. Die aktuelle Energiekrise zeigt nun einmal mehr den dringenden Handlungsdruck in Bezug auf die Transformation des Energiesystems auf. Aus diesem Grund soll ein besonderer Fokus auf kurz- und mittelfristig zu erreichende Ziele (bis 2030) gelegt werden.

Die relevantesten Innovationstreiber ergeben sich aus Trends, die aktuell die Energiesystemtransformation bestimmen und den entsprechenden Trends im Bereich der Digitalisierung. Neben den aktuell dominanten Themen der Energiesicherheit und der hohen Energiepreise, werden in der Studie weitere, längerfristige **energiewirtschaftliche Trends** mit einer hohen Relevanz für die nächsten Schritte der Transformation beleuchtet.

Nach einer Auswertung der **allgemeinen Trends der Digitalisierung**, beschreibt die Studie gezielt den Stand der Digitalisierung des Energiesystems. Hierbei liegt der Fokus auf Bereichen, in denen kurz- bis mittelfristige Maßnahmen (bis 2030) zu einer Beschleunigung und effizienteren Umsetzung der Energiewende beitragen können. Die Bereiche, die den größten Hebel bieten, um die klimaneutrale Energiewirtschaft mit digitalen Werkzeugen bestmöglich zu etablieren, sind die Folgenden:

- Datenökonomie
- Sektorenkopplung
- Anlagenkommunikation
- Netzbetrieb und -planung
- Cybersecurity im Energiesystem

Aufgebaut wurde die Thesenstudie grundlegend auf der Kooperation der Fraunhofer-Institute des Exzellenzclusters CINES. Ein interdisziplinäres Team von Wissenschaftler:innen hat im Rahmen dieser Kooperation eine übergeordnete Stellungnahme der Fraunhofer-Energieforschung zum Stand der Digitalisierung des Energiesystems erarbeitet.

Dies geschah im Rahmen von folgendem Vorgehen: In einem moderierten Prozess wurde eine systemische Szenario-Analyse der Digitalisierung des Energiesystems durchgeführt. Hierbei wurden relevante Schlüsselfaktoren und Akteur:innen charakterisiert und priorisiert und zudem relevante Anwendungsfelder für die Digitalisierung der Energieversorgung bis zum Jahr 2030 herausgestellt. Erörtert wurden hierbei technologische und gesellschaftliche Trends und die daraus resultierenden Unsicherheiten und offenen Zukunftsfragen.

Durch die Formulierung von drei alternativen Zukunftsbildern wurden dabei unterschiedliche Ausprägungen, Wechselwirkungen und Systemdynamiken dieser Schlüsselfaktoren und -akteure thematisiert. Das Best-Case-Szenario thematisierte eine ideale Transformation des Energiesystems in Verbindung mit einer starken Digitalisierung. Das Business-as-usual-Szenario thematisierte eine schwache Digitalisierung in Verbindung mit einer zögerlichen Energiewende. Das Worst-Case-Szenario konterkarierte die beiden Szenarien mit einer verschleppten Energiewende und einer unterschätzten Digitalisierung.

Aus der Diskussion dieser Zukunftsprojektionen wurden fünf relevante Handlungsfelder strukturiert und Thesen-Entwürfe erstellt. In mehreren Diskussionsrunden wurden diese Thesenentwürfe hinterfragt und optimiert. Dabei wurden externe Expert:innen von Energieversorgungsunternehmen, Netzbetreibern, Branchenverbänden, Herstellern und Dienstleistern eingebunden und konnten sowohl über Online-Fragebögen als auch in strukturierten Diskussionsrunden konstruktive Kritik und Impulse geben. Aus dieser Wissenschafts-Praxis-Interaktion schärfte die Projektgruppe dann die Thesen für die »Digitalisierte Transformation des Energiesystems bis 2030«. Wert wurde vor allem auf eine verständliche Zielgruppenansprache und die Formulierung von konkreten Handlungsempfehlungen, aufgeschlüsselt nach Zielgruppen, gelegt.

Die Studie ist folgendermaßen aufgebaut: In Kapitel 1 werden die Transformation und die dazugehörigen Trends des Energiesystems beschrieben, die als Anforderungen für den Einsatz technologischer Innovationen verstanden werden können. Kapitel 2 zeigt technologische Trends in der Digitalisierung auf. Hier liegt der Fokus auf Werkzeugen, die gegenwärtig oder potenziell zukünftig in der Energiewirtschaft Anwendung finden. Kapitel 3 und 4 sind nach Schwerpunktthemen gegliedert. Kapitel 3 beschreibt zunächst den Stand der Digitalisierung. Darauf aufbauend legt Kapitel 4 Thesen und Handlungsempfehlungen dar, die eine Diskussion zur zukünftigen Gestaltung der Digitalisierung des Energiesystems anregen sollen. Ein Fazit mit einer zusammenfassenden Botschaft findet sich am Ende.

2 Transformation und Trends der Energieversorgung

Die Energiewirtschaft steht vor der großen Herausforderung Nachhaltigkeit und Energieversorgungssicherheit langfristig zu gewährleisten und mit einem zunehmend diversifiziertem Marktumfeld umzugehen. Zudem gibt es aktuell im Vergleich zu den vergangenen Jahren sehr hohe Energiepreise sowie mögliche Versorgungsengpässe bei fossilen Energieträgern. Das sind zentrale Entwicklungen in der Energiewirtschaft, die zu einer umfassenden Transformation der Energiewirtschaft führen. Nachfolgend werden daher relevante Trends, veränderte und neue Aufgaben, und Geschäftsmodelle in der Energiewirtschaft dargestellt, die eine Transformation unterstützen und beschleunigen können und sich bereits heute abzeichnen. Nachhaltigkeit und Energieversorgungssicherheit beeinflussen die Entwicklung von Energieinfrastrukturen und führen zu einer stärkeren Integration des gesamten Energiesystems [1]. Die Dekarbonisierung sämtlicher Anwendungsbereiche führt zu einer starken Kopplung des Industrie-, Wärme- und Verkehrssektors mit dem Stromsektor und erhöht die Komplexität und Vernetzung der Sektoren. Digitalisierung spielt dabei als Enabler und Facilitator eine wichtige Rolle, um notwendige Veränderungen energiewirtschaftlicher Prozesse schneller zu implementieren und effizienter umzusetzen.

Starker Zubau an erneuerbaren Energien

Die klimapolitischen Ziele aus dem Paris-Abkommen bedingen einen sehr starken Ausbau der erneuerbaren Energien weltweit und auch in Europa und Deutschland, sowie gleichzeitig eine weitere Steigerung der Energieeffizienz über alle Anwendungsbereiche [2]. Das sogenannte Osterpaket der Bundesregierung will die Treibhausgasneutralität bereits 2045 erreichen und daher den jährlichen Ausbau der erneuerbaren Energien auf ca. 23 Gigawatt für PV-Anlagen und ca. 10 Gigawatt für Windanlagen an Land ausweiten [3]. Dies entspricht bei einer durchschnittlichen Anlagenleistung von 20 Kilowatt bei PV-Anlagen einer Anlagenanzahl von mehr als 1 Mio. PV-Anlagen pro Jahr (in 2021 knapp 200.000). Im Windbereich an Land und einer durchschnittlichen Anlagenleistung von 4.000 Kilowatt entspricht der angestrebte Zubau einer jährlichen Anlagenzahl von 2.500 (484 in 2021). Damit ist zukünftig von deutlich mehr Anschlussanfragen und Planungsprozessen auszugehen.

Auf europäischer Ebene hat die EU-Kommission mit dem RePowerEU-Plan das Ziel, die Abhängigkeit von russischem Gas, Öl und Kohle zu reduzieren und den Ausbau erneuerbarer Energien zu beschleunigen [4]. Die Solarkapazität soll dazu bis 2030 in der EU verdoppelt werden, Genehmigungsverfahren sollen vereinfacht werden und 10 Mio. Tonnen erneuerbarer Wasserstoff soll bis 2030 in der EU erzeugt werden.

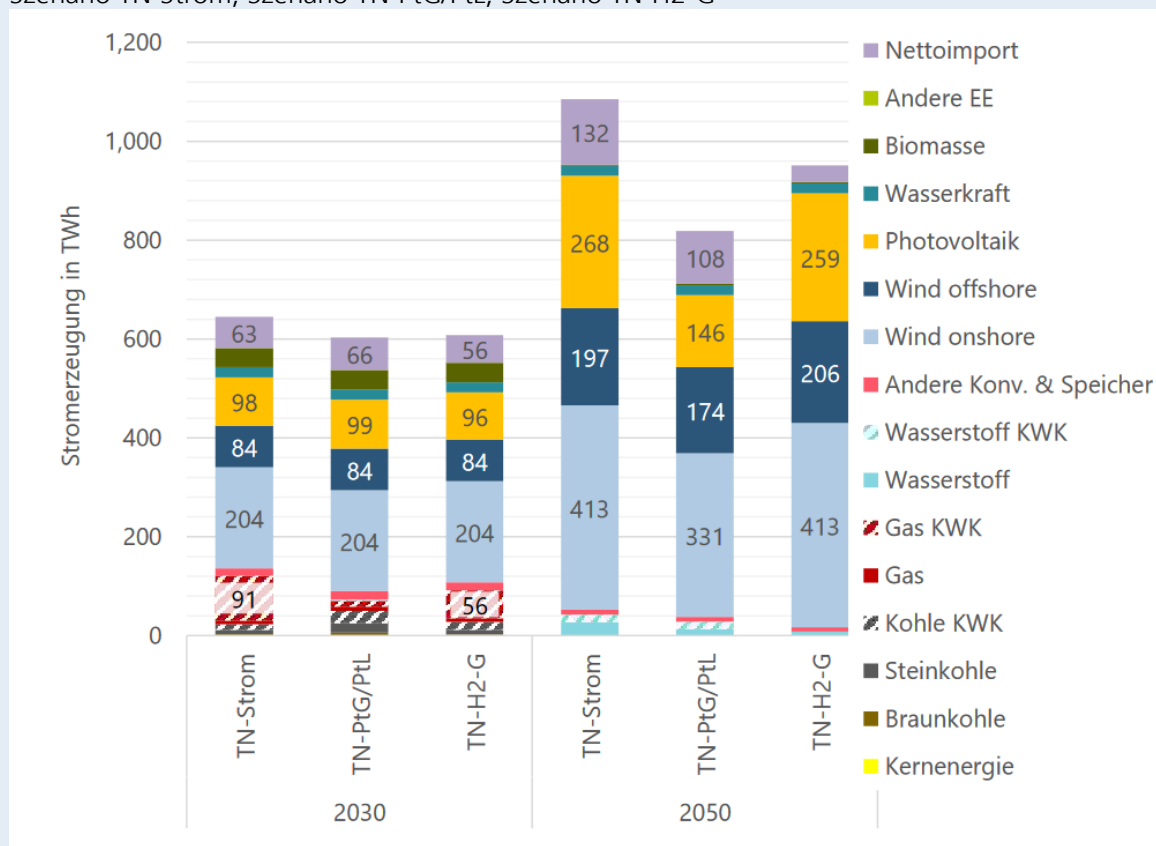
»Die Ausbaugeschwindigkeit für erneuerbare Energien wird sich deutlich erhöhen.«

Wie spiegelt sich der Trend in langfristigen Transformationsszenarien?

Analysen zu langfristigen Transformationspfaden zeigen, dass der Stromsektor deutlich mehr Strom produzieren könnte, der vornehmlich durch Wind an Land sowie durch PV-Anlagen und Wind auf See bereitgestellt wird. Auch der Nettostromimport könnte Szenarioanalysen zufolge ansteigen.

Abbildung 1: Stromerzeugung in Deutschland in 2030 und 2050 nach Energieträgern

Szenario TN-Strom, Szenario TN-PtG/PtL, Szenario TN-H2-G



Quelle: BMWK-Langfristszenarien 2021

2.1 Energiesicherheit und hohe Energiepreise

Durch die Ukraine Krise ist die Verfügbarkeit von Erdgas aus Russland sehr stark eingeschränkt und neue Lieferanten spielen eine wichtige Rolle für die deutsche Energieversorgung. Gleichzeitig wirkt sich die begrenzte Verfügbarkeit sehr stark auf die Preise verschiedener Energieträger, insbesondere auch von Strom, aus. Informationen über die Verfügbarkeit und die Höhe der Strompreise gewinnen dadurch an Bedeutung. Industrieunternehmen stehen vor der Herausforderung, die bisherige Wertschöpfung auch in einem dekarbonisierten Energiesystem zu erhalten und mit zum Teil deutlich höheren Energiepreisen in Zukunft zu produzieren.

»Planbare Energiepreise und Versorgungssicherheit sind Grundlage für industrielle Wertschöpfung.«

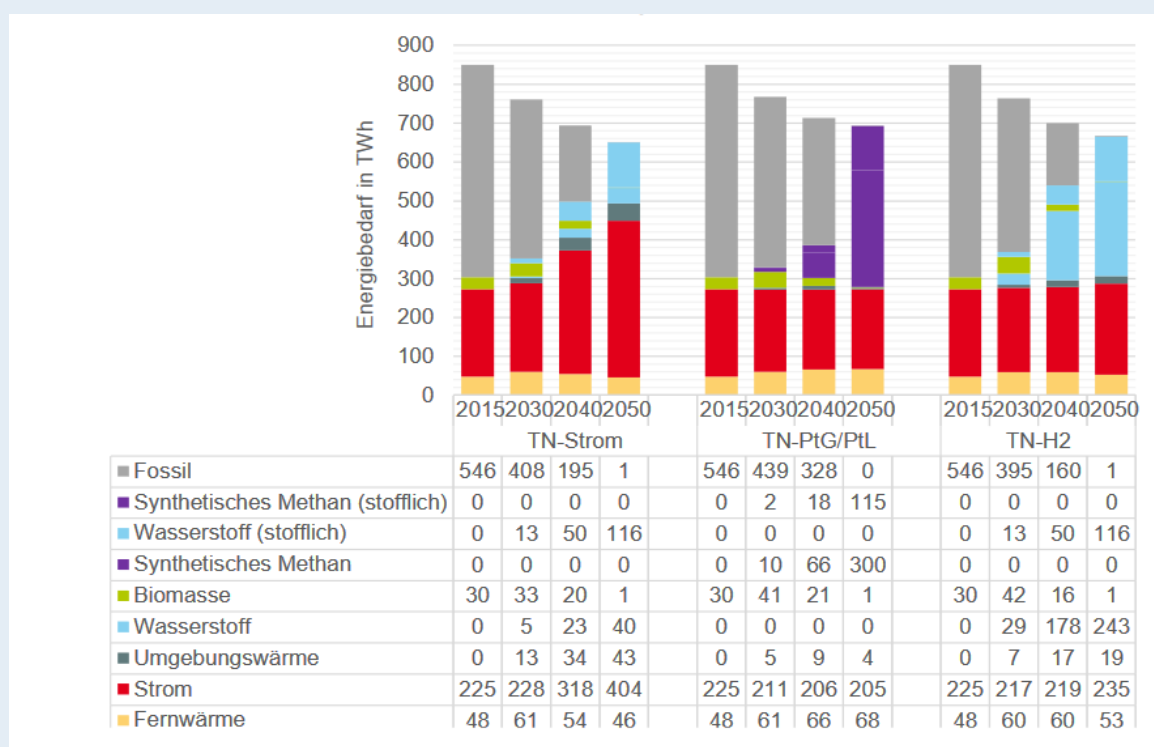
Neben der nationalen Erzeugung auf Basis von erneuerbaren Energien ist der Import von Energieträgern über bestehende Infrastrukturen, aus Europa und darüber hinaus, nach Deutschland von großer Bedeutung für die zukünftige Energiesicherheit und das Energiepreinsniveau. Die Nutzung von Wasserstoff insbesondere in der Industrie als Energieträger und auch als Rohstoff wird an Bedeutung gewinnen. Daraus ergibt sich auch der Bedarf für neue Infrastruktur, vor allem für den Transport von Wasserstoff.

Wie spiegelt sich die Entwicklung in langfristigen Transformationsszenarien?

Im Industriebereich zeigen langfristige Dekarbonisierungsszenarien, dass Strom und Wasserstoff als Energieträger stark an Bedeutung gewinnen. Dies bedingt einen zusätzlichen Infrastrukturbedarf für den Transport der Energieträger. Darüber hinaus ergibt sich eine größere Flexibilität im Industriebereich, wenn Produktionsprozesse stärker an fluktuierenden erneuerbaren Energien ausgerichtet werden, sowie eine Ausweitung von Speichermöglichkeiten. Gleichzeitig ist auch eine Steigerung der Energieeffizienz als Dekarbonisierungsstrategie zielführend, um damit den Gesamtenergiebedarf zu senken. Szenarioberechnungen weisen eine Reduktion von 23 Prozent des Endenergiebedarfs in der Industrie im Vergleich zu 2015 aus.

Abbildung 2: Transformation Industriesektor nach Energieträgern und Endenergiebedarf in Deutschland bis 2050

Szenario TN-Strom, Szenario TN-PtG/PtL, Szenario TN-H2-G



Quelle: BMWK-Langfristszenarien 2021

2.2 Sektorenkopplung im Verkehrsbereich

Dekarbonisierungsstrategien spielen sowohl für das Energiesystem insgesamt als auch für einzelne Akteur:innen eine bedeutende Rolle. Damit gewinnen Informationen zum aktuellen Status des Energieverbrauchs sowie der damit verbundenen Emissionen an Relevanz. Darauf aufbauend entwickeln eine Vielzahl an Beteiligten Maßnahmen, um ihre Emissionen zu reduzieren. Zwei besonders relevante Anwendungsbereiche dabei sind die Elektromobilität sowie der Wärmesektor mit Power-to-Heat Anwendungen. Im aktuellen Koalitionsvertrag ist der Markthochlauf der Elektromobilität mit 15 Mio. Elektrofahrzeugen bis 2030 als Ziel definiert worden und stellt eine zentrale Strategie zur Dekarbonisierung des Verkehrssektors dar. Mit der steigenden Anzahl an Fahrzeugen ergibt sich zusätzlicher Strombedarf für das Laden der Fahrzeuge, der nach dem aktuellen Szenariorahmen des Netzentwicklungsplans bis 2037 auf über 100 Terawattstunden ansteigen kann. Die Fahrzeugbatterien stellen gleichzeitig auch einen dezentralen Speicher dar, wodurch sich neue Aufgaben für die Energiewirtschaft wie intelligentes und bidirektionales Laden, aber auch eine Optimierung der Eigenversorgung ergeben.

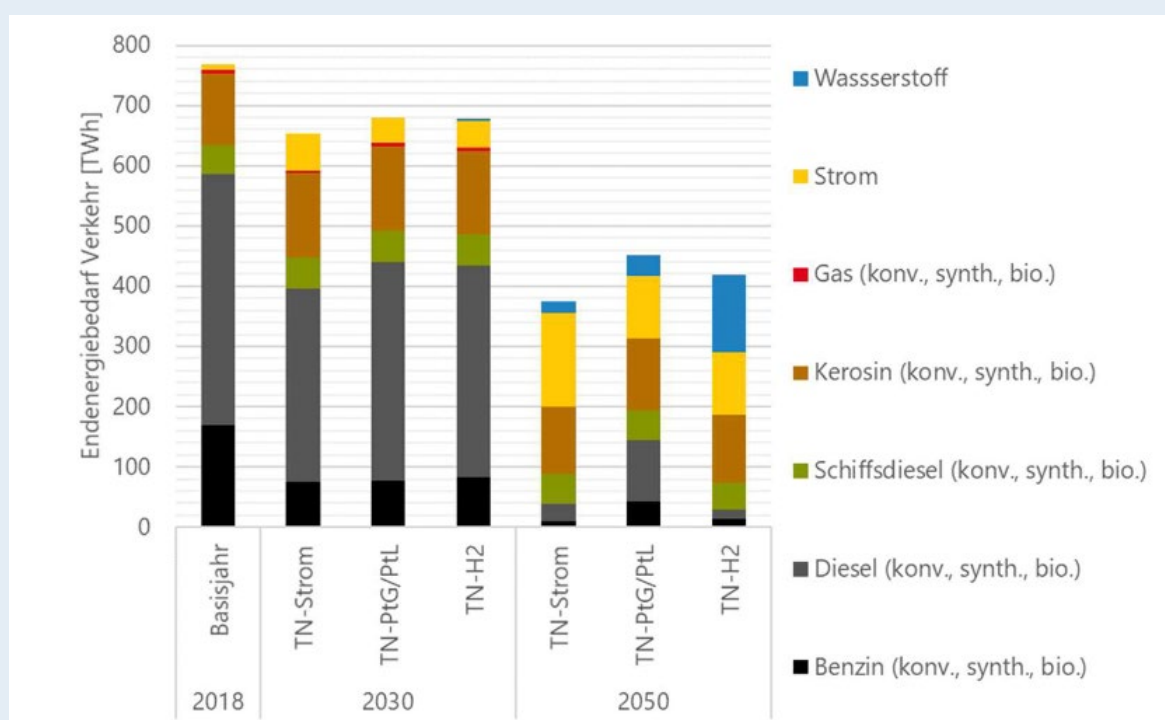
»Neue digitale Geschäftsmodelle etablieren sich für die Elektromobilität.«

Wie spiegelt sich die Entwicklung in langfristigen Transformationsszenarien?

Im Verkehrsbereich werden zukünftig neben einer deutlichen Steigerung der Energieeffizienz vor allem Strom und synthetische Kraftstoffe als Energieträger zu einer möglichen Dekarbonisierung beitragen. Der Endenergiebedarf sollte auf Basis von Szenariorechnungen im Verkehrssektor um 50 Prozent sinken, wobei ein Großteil davon durch PKW und LKW realisiert werden könnte. Die Verbreitung der Elektromobilität könnte deutliche Effizienzsteigerungen ermöglichen und würde gleichzeitig auch zu einem starken Anstieg des Energieträgers Strom im Verkehrssektor führen. Neben Strom ist auch der Einsatz von Wasserstoff und synthetischen Kraftstoffen (insbesondere im Schiff- und Flugverkehr) eine relevante Dekarbonisierungsoption.

Abbildung 3: Szenarien für Transformation des Energiebedarfs im Verkehr bis 2050

Szenario TN-Strom, Szenario TN-PtG/PtL, Szenario TN-H2-G



Quelle: BMWK-Langfristszenarien 2021

Die Entwicklung der Elektromobilität hat in den letzten Monaten einen starken Anstieg verzeichnet, so dass mittlerweile ca. 14 Prozent der Neuzulassungen batterieelektrische Fahrzeuge sind. Durch die zunehmend größeren Batterien der Fahrzeuge werden Geschäftsmodelle für das intelligente Laden und zur Unterstützung des Stromnetzes intensiv diskutiert [5]. Der Nutzen für einzelne Anwendende ergibt sich durch einen günstigeren Strombezug bei angebotsorientiertem Laden bzw. hoher Verfügbarkeit von erneuerbarem Strom. Weitere energiewirtschaftliche Effekte im Gesamtsystem sind zum einen höhere Auslastungen der Netze, wenn das Laden der Batterien nicht zu Spitzenlastzeiten erfolgt, aber auch stärkere Netzbelastungen in der Spitze, wenn sich die Gleichzeitigkeit der Ladevorgänge erhöht. Für eine effektive Netzintegration müssen Kund:innen und Stromnetze durch schnellen und automatisierten Datenaustausch verbunden werden, um die Nutzung der Flexibilitätspotenziale im Sinne der Kund:innen und Netzdienlichkeit zu ermöglichen.

Außerdem wird so hohe Netzbelastung vermieden und die Kundenakzeptanz nicht zu beeinträchtigt.

Für die Nutzer:innen von Elektrofahrzeugen werden serviceorientierte Angebote relevanter, die E-Fahrzeuge mit einer Eigenversorgung koppeln und dabei einen optimierten Betrieb in Kombination mit einer eigenen Erzeugungsanlage ermöglichen. Für die Bereitstellung von Flexibilität durch die Fahrzeugbatterie an öffentlichen Ladepunkte oder an Ladepunkten am Arbeitsplatz ist eine kleinteiligere Vermarktung von Energiemengen von steigender Bedeutung. Verschiedene Geschäftsmodelle dazu sind mittlerweile durch energiewirtschaftliche Akteure als auch durch die Fahrzeughersteller selber entwickelt worden [6]. Die wichtigsten Anwendungen dabei sind:

- Optimierte Ladestrategien (in Abhängigkeit der Erzeugungssituation und Erzeugungskosten),
- Bereitstellung von Systemdienstleistungen,
- Entlastung von Netzeinsparungen und Vermeidung von Spitzenlasten,
- Unterstützung bei der Spannungshaltung,
- Vermeidung von Einspeisemanagement,
- Optimierung der Eigenversorgung und
- Optimierter Einsatz von High Power Charger.

»Der Aufbau und die Integration von Ladeinfrastruktur stellt eine Herausforderung für Verteilnetze dar.«

Der erwartete Anstieg von Elektrofahrzeugen bedingt einen umfassenden Aufbau an Ladeinfrastruktur, der in die bestehenden Stromnetze integriert werden muss. Dabei wird erwartet, dass ein Großteil der Ladeinfrastruktur im privaten Bereich (insbesondere in Ein- und Zweifamilienhäusern) und am Arbeitsplatz installiert wird. Zusätzlich ist der Ausbau einer öffentlichen Ladeinfrastruktur mit mittleren und hohen Ladeleistungen geplant, um die Elektromobilität auch für längere Strecken und Nutzer:innen ohne eigene Lademöglichkeit attraktiv zu machen [7]. Durch einen umfassenden Ausbau der Ladeinfrastruktur sind die Batteriespeicher von Elektrofahrzeugen als Energiespeicher nutzbar. Vehicle-to-Grid (V2G) Konzepte [6, 8] können zukünftig mit geeigneten Kommunikations- und Steuerungstechnologien umgesetzt werden (OCPP/ISO Standards) und bestehende Anwendungen für einen effizienten Netzbetrieb ergänzen oder auch ersetzen.

2.3 Transformation der Wärmeversorgung

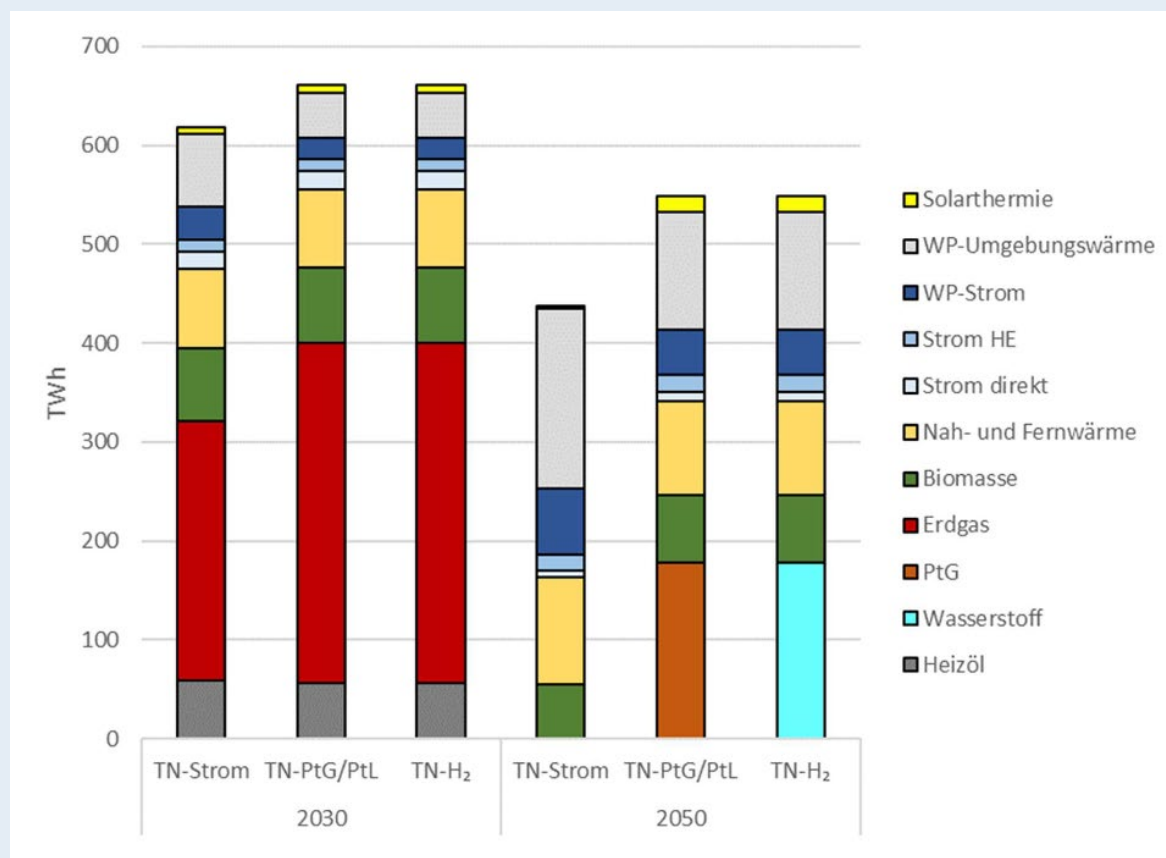
Abweichend vom Stromsektor, kommt die Transformation der Wärmeversorgung eher schleppend voran. Stieg der Anteil erneuerbarer Energien am Endenergieverbrauch von rund 2 Prozent im Jahr 1990 auf 14 Prozent im Jahr 2012 an, stagniert die Dekarbonisierung der Wärmeversorgung seitdem auf diesem Niveau. Die erneuerbar erzeugte Wärme wird derzeit im Wesentlichen aus der Verbrennung fester Biomasse in privaten Haushalten gewonnen. Weitere erneuerbare Quellen, wie Umweltwärme, Solar- und Geothermie erzeugen bisher nur 2 Prozent der benötigten Wärme. Fossile Brennstoffe, wie Erdgas (46 Prozent) und Erdöl (15 Prozent), sind weiterhin die dominierenden Energieträger. Auch wenn aufgrund von Effizienzsteigerungen der für Raumwärme, Warmwasser und Prozesswärme aufgewendete Anteil der Energie rückläufig ist, macht er auch heute immer noch knapp die Hälfte des Endenergieverbrauchs aus und ist damit der größte Verbrauchsbereich vor Strom und dem Verkehr.

Wie spiegelt sich die Entwicklung in langfristigen Transformationsszenarien?

Die Transformation im Wärmesektor, die neben der Raumwärme für Gebäude auch Warmwasser umfasst, wird in langfristigen Szenarien geprägt durch eine deutliche Steigerung der Energieeffizienz sowie durch einen Wechsel der Energieträger weg von Gas zu Strom. Mögliche Zukunftsszenarien für den Gebäudesektor weisen hier eine Reduktion des Endenergiebedarfs von 41 Prozent bis 2050 im Vergleich zu 2020 aus. Wärmepumpen tragen in 2050 maßgeblich zur Wärmeversorgung bei und könnten nach Szenariorechnungen ihren Anteil von 5 Prozent in 2020 auf knapp 60 Prozent in 2050 steigern. Der Anteil des aus Wärmenetzen bereitgestellten Endenergiebedarfs steigt dabei gleichzeitig von unter 10 Prozent im Jahr 2020 auf 25 Prozent in 2050 an.

Abbildung 4: Szenarien für Transformation des Energiebedarfs in der Gebäude-Wärme bis 2050

Szenario TN-Strom, Szenario TN-PtG/PtL, Szenario TN-H2-G



Quelle: BMWK-Langfristszenarien 2021

Durch die aktuelle geopolitische Lage, aber auch durch den immer deutlicher sichtbar werdenden Klimawandel kommt der Transformation der Wärmeversorgung durch die Dekarbonisierung und Sektorenkopplung in Deutschland bzw. Europa eine immer größere und dringendere Bedeutung zu. Somit wird gerade der Wärmeversorgung eine langanhaltende und weitreichende Entwicklung bevorstehen.

»Elektrifizierung und Umbau von Wärmenetzen sind Schlüsseltechnologien im Wärmesektor.«

Neben der Steigerung der Energieeffizienz und der damit einhergehenden Einsparungen im Wärmeverbrauch rücken aktuell weitere Handlungsfelder zur Transformation der Wärmeversorgung in den Vordergrund. Dazu zählt die weitreichende Dekarbonisierung der Wärmeerzeugung des gesamten Sektors. Weiterhin sind Effizienzsteigerung und die flächendeckende Integration von Wärmepumpen in die Wärmeversorgung sowie der nötige Ausbau der leitungsgebundenen Wärmeversorgung wichtige Schlüsseltechnologien dieser Transformation. Neben der Bereitstellung von Raumwärme und Wärme für die Bereitung von Trinkwarmwasser, ist die Prozesswärme, die sich gerade auf höheren Temperaturniveaus in vielen Anwendungsbereichen der energieintensiven Industrie nicht einfach elektrifizieren oder anderweitig substituieren lässt, ein wichtiger Bereich der Transformation. Hier kann durch eine Nutzung von Gasen aus Power-to-Gas-Anlagen der Wärmesektor eine wichtige Rolle als Abnehmer und Speicher der Energie aus Wind- und Solarstrom einnehmen. Um weitere erneuerbare Erzeuger und Abwärme aus Industrie- und anderen Prozessen effizient in das Wärmesystem integrieren zu können, ist es notwendig bestehende Fernwärmenetze hin zu geringen Systemtemperaturen zu transformieren sowie neue Niedertemperatur-Nahwärmenetze umzusetzen. Auch die Speicherung von regenerativ erzeugter Wärme in Groß- und Langzeitspeichern ist ein wichtiger Baustein für die lokale Transformation. Für die entsprechende Anlagentechnik und Infrastruktur werden für die Nutzung lange Zeiträume von Dekaden angenommen. Daher gestaltet sich die Transformation der Wärmeversorgung entsprechend langwierig.

2.4 Umbau der Stromnetze

Der Stromnetzbetrieb ist in den letzten 20 Jahren deutlich agiler und volatiler geworden. Von einem reinen verbrauchsgetriebenen Netzbetrieb, mit zentraler Einspeisung vorwiegend in der Höchstspannung durch fossile Großkraftwerke, hin zu dem dezentralen System, in welchem neben dem Verbrauch auch die Einspeisung aus allen Netzebenen signifikant geworden ist. Diese Situation bietet völlig neue Herausforderungen an alle Beteiligten, aber auch neue und innovative Möglichkeiten den Netzbetrieb sicherer, stabiler und effizienter zu gestalten. Digitalisierung und Automatisierung spielen bereits eine wichtige Rolle, die zukünftig weiter zunehmen wird.

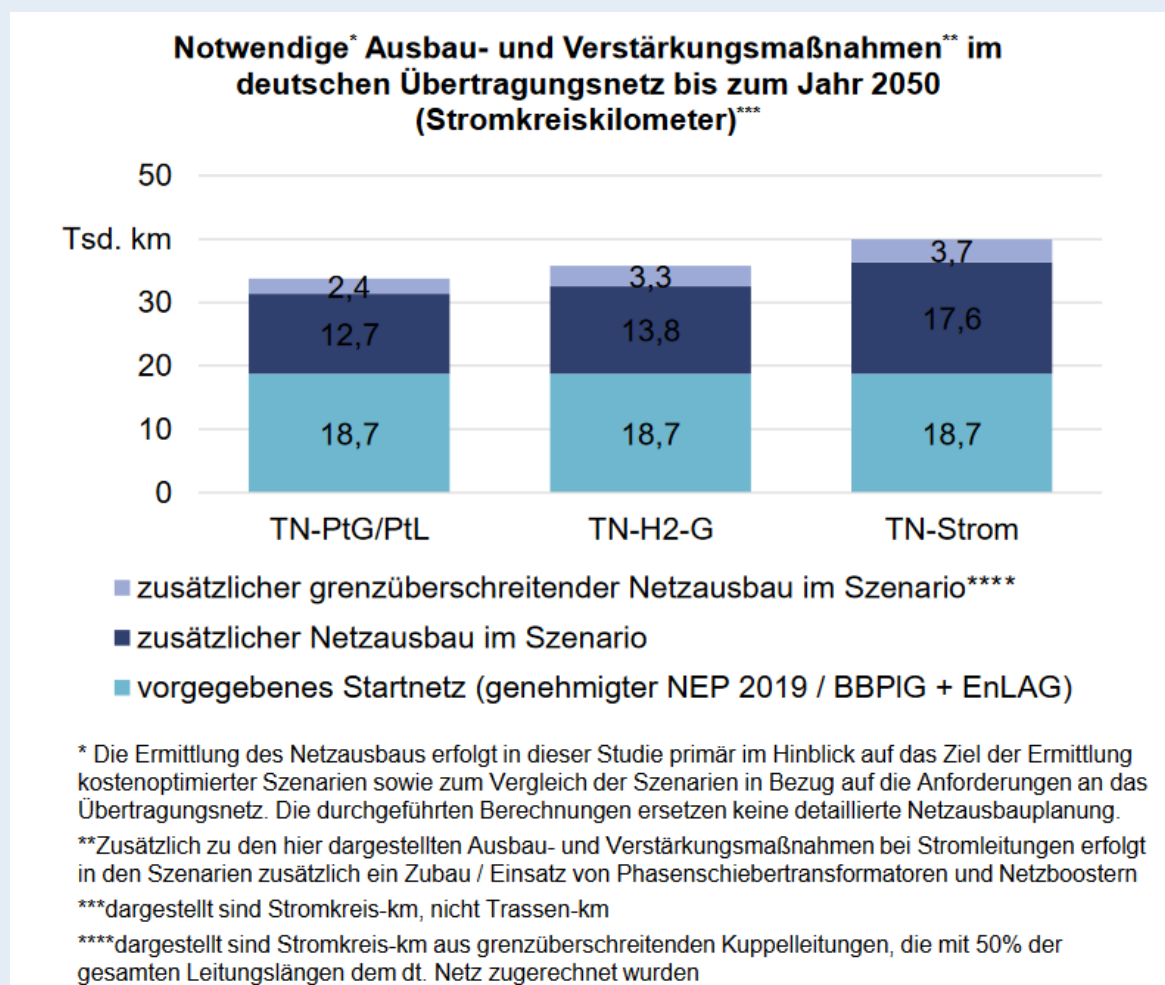
In einem Energiesystem, welches nur noch auf erneuerbaren Energien basiert, wird die Abstimmung zwischen Erzeugern, Nachfragern und den Netzbetreibern komplexer, z.T. sind sehr kleinteilige Abstimmungen zwischen einer Vielzahl an Akteure in verschiedenen energiewirtschaftlichen Prozessen (u.a. Vermarktung, Redispatch) notwendig. Durch die Digitalisierung der Datenlandschaft im Bereich der Stromnetze lassen sich Prozesse automatisieren und somit signifikant kosteneffizienter gestalten. Insbesondere ist hier der bisher benötigte Zeitaufwand zu nennen, der hohe Personalkosten verursacht und Fachkräfte in den sich wiederholenden Aufgaben bindet.

Wie spiegelt sich die Entwicklung in langfristigen Transformationsszenarien

Die Transformation des Energiesystems mit einer deutlichen Ausweitung des Strombedarfs sowie der Erschließung kostengünstiger Standorte für erneuerbare Energien im In- und Ausland bedingt einen zusätzlichen Infrastrukturbedarf im Übertragungsnetz. Der nationale und internationale Stromtransport im Übertragungsnetz steigt dadurch deutlich an. In den Langfristszenarien des BMWK wird ein Ausbau von bis zu 40.000 km Stromkreislänge berechnet, wenn die Dekarbonisierung der Anwendungssektoren sehr stark auf einer Elektrifizierung der wichtigsten Prozesse und Anwendungen setzt. Damit würde sich die Stromkreislänge im Übertragungsnetz etwa verdoppeln, wenn der aktuelle Stand der Netzstrukturdaten von 2020 mit 37.500 km als Basis verwendet wird. Auch der Austausch mit den Nachbarländern nimmt in diesen Szenarien zu, so dass auch die grenzüberschreitende Infrastruktur ausgebaut werden sollte. Insgesamt ist mit einer deutlichen Ausweitung der Planungsprozesse zu rechnen, die neben der Strominfrastruktur auch die Wärme-, Wasserstoff und Gasinfrastruktur umfassen wird (DENA - SEP-Vorschlag).

Abbildung 5: Ausbau des Übertragungsnetzes und der grenzüberschreitenden Kuppelstellen bis 2050

Szenario TN-Strom, Szenario TN-PtG/PtL, Szenario TN-H2-G



Quelle: BMWK-Langfristszenarien 2021

Der Umbau der Erzeugungsstruktur führt auch zu einer Veränderung des Systembetriebs des Stromnetzes, da die Frequenzhaltung im Stromnetz immer weniger durch rotierende Massen sichergestellt werden kann. Neue Konzepte wie netzstützende Transformatoren und veränderte Redispatch-Maßnahmen werden in einem von erneuerbaren Energien dominierten Energiesystem immer wichtiger [9].

Abstimmungsprozesse zwischen Netzbetreibern nehmen zu und können massiv beschleunigt werden, wenn die auszutauschenden Informationen in einheitlicher digitaler und standardisierter Form vorliegen. Die Anzahl an Redispatch-Maßnahmen und die Anzahl an darin involvierten Akteur:innen und Anlagen ist in der Vergangenheit deutlich angestiegen, um Engpässe im Stromnetz zu beheben. Schnellere und präzisere Maßnahmen machen den Stromnetzbetrieb kosteneffizienter im Vergleich zum derzeitigen Redispatch 2.0- Prozess, der zum Teil noch durch manuelle und stellenweise ineffiziente Redispatch-Prozesse geprägt ist. Sowohl eine präzisere und effizientere Abstimmung zwischen den Netzbetreibern als auch eine Kommunikation zwischen Netzbetreibern, kleineren Anlagen und Betriebsmitteln ist zukünftig notwendig, um einen sicheren Betrieb und eine sichere Steuerung der Netze zu gewährleisten.

»Die Vielzahl an neuen Erzeugern, Verbrauchern und Speichern in der Niederspannung macht einen Umbau der Verteilnetze notwendig.«

Der Trend geht zur Integration immer kleinerer Anlagen bis in die Haushaltsebene (Dach-PV, Heimspeicher, Ladepunkte, etc.). Diese Anlagen können für Systemdienstleistungen und zur Kompensation bzw. Abfederung von Einspeise- und Verbrauchsspitzen eingesetzt werden. Um diese Potenziale, die bisher nur in einem begrenztem Umfang ausgeschöpft sind, nutzbar zu machen, werden aktuell Anstrengungen unternommen, den Redispatch 2.0-Prozess nach »unten« (in die unteren Netzebenen) fortzusetzen und zu optimieren (Redispatch 3.0). Als signifikante Faktoren werden hier PV-Speichersysteme, Elektromobilität (mit Bi-Direktionalem Laden) und Wärmepumpen genannt. Diese Assets bieten hervorragende Steuerungsmöglichkeiten, erfordern allerdings wegen ihrer Kleinteiligkeit eine gute Koordination, um aus der lokalen Position globale Wirkung zu erzielen. Grundlegend hierfür wird eine digitale Informationsgrundlage der Nieder- und Mittelspannungsnetze sein, um darauf aufbauend digitale Prozesse der Automatisierung und Koordination zu realisieren.

2.5 Bereitstellung von Flexibilität

Die Transformation von einer zentralen Energieversorgung auf Basis von fossil-nuklearen Energieträgern hin zu einer dezentralen, erneuerbaren Energieversorgung hat weitreichende Folgen für das Energiesystem. Durch den Ausbau der erneuerbaren Energien wird die Fluktuation auf der Seite der Energiebereitstellung deutlich zunehmen. Daraus resultiert ein zunehmender Bedarf an Reservekapazität und Flexibilität insbesondere im elektrischen Energiesystem. Die Flexibilisierung der Energieverbrauchsseite ist ein wichtiger Baustein für das Gelingen der Energiewende. Flexibel einsetzbare Verbraucher:innen und Anlagen können dazu beitragen den Energiebedarf gezielt in Zeiten der erneuerbaren Energiebereitstellung zu verlagern und eine direkte und effiziente Nutzung der CO₂-neutralen, erneuerbaren Energie zu ermöglichen. Hierdurch kann der Bedarf an wirkungsgradbehafteter Zwischenspeicherung reduziert werden. Bei einem lokalen Ausgleich des Energieverbrauchs und erneuerbarer Energiebereitstellung kann darüber hinaus, durch einen gezielten Einsatz von Flexibilitätsoptionen, das vorgelagerte Energiesystem entlastet und die Integrationsfähigkeit von erneuerbaren Energieanlagen erhöht werden.

Viele Anlagen und Prozesse haben Potenzial den Energieverbrauch zeitlich von der Energiebereitstellung zu entkoppeln und eine Anpassung des Energiebedarfs an volatile Energiebereitstellung

aus erneuerbaren Energiequellen zu ermöglichen. Die zeitlichen, leistungsmäßigen und energetischen Potenziale der unterschiedlichen Flexibilitätsoptionen zur Lastverschiebung sind vielfältig. Sowohl Großanlagen als auch zusammengefasste (aggregierte) Kleinanlagen, insbesondere aus dem Bereich der Sektorenkopplung (P2X-Technologien), haben besondere Relevanz, die volatile Energiebereitstellung aus erneuerbaren Energieanlagen (speziell Windkraft- und Photovoltaik-Anlagen) auszugleichen und direkt zu nutzen [10].

Die Nutzung der unterschiedlichen Flexibilitätsoptionen ist für mehrere Anwendungsfälle möglich und kann nach markt- und netzgetriebenen Einsatzfällen unterschieden werden. So gehört z. B. die Nutzung von Flexibilitätsoptionen zur Maximierung des lokalen Eigenverbrauchs von erneuerbaren Energien und weitere auf Nutzerzentrierung und aktive Beteiligung von Anwendenden ausgerichtete Geschäftsmodelle/Anwendungsfälle zu einer marktgetriebenen Nutzung von Flexibilitätsoptionen. Beispiele dafür sind Mieterstrom, virtuelle Kraftwerke, Gebäudeenergiemanagement, Lastmanagement für die Industrie, Demand Side Management, gesteuertes Laden von Elektrofahrzeugen und zukünftig Energy Communities (ggf. Bürgerenergiegesellschaft oder Energy Sharing) (siehe auch Abschnitt zu Nutzerzentrierung und aktive Beteiligung von Anwendenden) [11].

»Sektorenkopplung und Verbrauchs-Flexibilisierung sind ein wichtiger Baustein für das Gelingen der Energiewende.«

Des Weiteren können Einsatzfälle zur Nutzung von Flexibilitätsoptionen aus dem Netzbetrieb resultieren (u.a. Vehicle to Grid Konzepte). Der Netzbetrieb ist verantwortlich und trägt zur Sicherstellung der Versorgungssicherheit bei. Hierfür können Flexibilitätsoptionen in die Handlungskaskade zum Engpassmanagement der Netzbetreiber zur Einleitung und Durchführung von Netzsicherheitsmaßnahmen integriert werden und zur Sicherstellung des Netzbetriebs beitragen. Darüber hinaus können Flexibilitätsoptionen im Netzbetrieb dazu eingesetzt werden, die Netzauslastung zu verbessern und Netzverluste zu minimieren [12].

2.6 Transformation der Akteurslandschaft

Das Energiesystem ist historisch durch eine hohe Spezialisierung und Fokussierung auf einzelne Wertschöpfungsstufen gekennzeichnet, die von professionellen Akteur:innen dominiert wurden. Vor allem die Förderung und Gewinnung von fossilen Primärenergieträgern war räumlich fokussiert und stark von international geprägt [13]. Mit dezentralen, erneuerbaren Erzeugungsanlagen wandelt sich die klassische Wertschöpfungskette und damit die Akteurslandschaft erheblich. Heute ist es prinzipiell jeder Person möglich eine eigene Erzeugungsanlage zu betreiben. Dies beginnt im kleinsten Anlagensegment, mit den als »Balkonanlagen« bekannten Mini-Photovoltaik-Anlagen bis 600 Watt Wechselrichterleistung, hin zu Windparks im Megawattbereich in der Hand von Energiegenossenschaften mit tausenden Personen [14, 15].

Dabei sind auf Grund der geographischen Verteilung vermehrt fachfremde Beteiligte, wie kommunale Behörden, lokale Anwohnende, Landbesitzende und Interessenverbänden in Planung, Bau, Betrieb und Rückbau der Anlagen, sowie zugehöriger Infrastruktur, miteinzubeziehen. Neue Herangehensweisen sind notwendig, um eine aktive, faire sowie möglichst zügige Partizipation in den notwendigen Entscheidungsprozessen sicherzustellen.

Auch der Netz- oder der Messbetrieb kann nicht mit den Mitteln der Vergangenheit adressiert werden, wenn eine Vielzahl an eher fachfremden Betreibern von dezentralen Energieanlagen (DEA) als Prosumer integriert werden sollen. Hier treten bspw. mit dem intelligenten Messsystem, neue Themen wie Datenschutz auf, wenn die Erzeugungs- und Verbrauchsdaten ggf. in hoher

Auflösung im aktiven Verteilnetzbetrieb verwendet werden [16, 17]. Gleichzeitig sind die Daten von DEA potenziell für weitere Akteure interessant, wie zum Beispiel für die Hersteller der Anlagen, die auf dieser Basis weitere Anwendungsfälle wie »Health-Checks« oder darauf aufbauend »Predictive Maintenance« anbieten möchten. Dies ist an dieser Stelle zudem unabhängig von der jeweiligen Anlagengröße und betrifft somit Endverbraucher:innen als auch professionelle Akteur:innen aus der Energieversorgung [18].

»Die Akteursvielfalt steigt durch Sektorenkopplung und stärkere Vernetzung deutlich

In Summe zeigt sich an diesen Fallbeispielen, dass sich klassische Wertschöpfungsketten verändern und verstärkt alternative Wertschöpfungsnetzwerke entstehen, die von lokalen, regionalen als auch (inter)nationalen Akteur:innen besetzt sein können. Als Folge bilden sich neue serviceorientierte Geschäftsmodelle und veränderte Akteurslandschaften, die mit der hohen geographischen Verbreitung von dezentralen Energieanlagen sowie dazu notwendiger Infrastruktur (ausbauen) eine Vielzahl an neuen Stakeholdern einschließt, um am Ende die (digital getriebene) Transformation der Energieversorgung erfolgreich umzusetzen.

2.7 Nutzerzentrierung und aktive Beteiligung von Anwendenden

Für Energieverbrauchende entwickeln sich durch die Sektorenkopplung neue Möglichkeiten und Optionen, aktiv in das Energiesystem eingebunden zu werden und darüber den eigenen CO₂-Fußabdruck zu reduzieren. Um über Investitionen in Elektrofahrzeuge, Wärmepumpen und Batteriespeicher sowie in energieeffiziente Geräte zu entscheiden, benötigen Nutzer:innen, Haushalte und Unternehmen individuelle Informationen, die an ihre Situation angepasst sind. Gleichzeitig ist für eine schnelle und effiziente Verbreitung von klimafreundlichen und energieeffizienten Technologien Feedback von Nutzer:innen sehr zentral, wenn diese Technologien angenommen werden sollen. Die Digitalisierung kann hierfür eine wichtige Grundlage darstellen.

Wie bereits am Beispiel der Elektromobilität eingeführt, entwickeln sich zunehmend Geschäftsmodelle um ein stark wachsendes Segment der sogenannten Flex- und Prosumer. Dabei handelt es sich einerseits um Letztverbraucher mit flexiblen dezentralen Energieanlagen wie bspw. Wärmepumpen auf der Verbrauchsseite, sowie andererseits Letztverbraucher, die zusätzlich eine Vor-Ort-Erzeugung aufweisen. Letzteres wird vor allem durch PV-Anlagen mit Überschusseinspeisung nach Eigenverbrauch im Haushaltsbereich dominiert [19, 20]. Zur Adressierung dieser Marktsegmente wird auf stark nutzerzentrierte Ansätze gesetzt. Vor allem die Maximierung des finanziell attraktiven Eigenverbrauchs ist bei kleineren Erzeugungsanlagen der primäre Treiber für eine Investition in die Anlagentechnik und dessen flexible Regelung. Darüber hinaus können weitere Anwendungen der kleinteiligen Flexibilitäten in Frage kommen. Im Detail handelt es sich in der Regel um Optionen nach der üblichen Unterscheidung »Behind-the-meter« (BTM) wie Eigenverbrauchsoptimierung, §14a EnWG, variable Strompreise oder Notstromfähigkeit, und »Front-of-the-meter« (FTM) -Anwendungen, bspw. Arbitrage-Geschäfte, Bereitstellung von Regelreserve, Mieterstrom oder Energy Sharing innerhalb von Quartieren / Energiegemeinschaften [21–24].

»Stärkere Nutzerzentrierung bedingt durch dezentrale Eigenerzeugung und flexible Letztverbraucher.«

Grundsätzlich bestehen bei den BTM- als auch bei den FTM-Anwendungen verschiedene (daten-) technische Anforderungen: Schnelle Reaktionsfähigkeiten, hochaufgelöste Messwerte und

schnelle Regelungsalgorithmen sind bspw. bei der Eigenverbrauchsoptimierung, dem Spitzenlastmanagement oder der Erbringung von primärer Regelleistung (Frequency Containment Reserve - FCR) notwendig. Für die Abrechnung z. B. von variablen Tarifen oder von Energieflüssen innerhalb von Energiegemeinschaften ist in der Regel das Viertelstundenraster der Bilanzkreisabrechnung ausreichend. In diesem Kontext ist vor allem die eichkonforme Erfassung im Gegensatz zu einer schnellstmöglichen Übertragung an die relevanten Marktakteure von Interesse. Aus Sicht der nutzerzentrierten Geschäftsmodelle sind vor allem die BTM- bzw. FTM-Anwendungen im Fokus, die einen ökonomischen, ökologischen sowie ggf. sozialen Mehrwert liefern. Insgesamt existieren an dieser Stelle signifikante Überschneidungen mit dem Bereich der E-Mobilität wie typische Anwendungen der Eigenverbrauchsoptimierung innerhalb von Gebäuden oder Quartieren, als auch in Energiegemeinschaften im Energy Sharing zeigen [14]. Ebenso gilt dies für die Nutzung variabler Stromtarife, Nutzung von Ausgestaltungsoptionen von §14a EnWG, sowie der Erbringung von Systemdienstleistungen wie Regelreserve oder nicht frequenzgebundenen Systemdienstleistungen [11, 14, 18–20].

2.8 Resilienz des Energiesystems

Die Anzahl an Erzeugungsanlagen, Speichern und steuerbaren Energie- und Stromverbrauchern steigt in einem nachhaltigen Energiesystem deutlich an. Gleichzeitig werden verschiedene Kommunikationssysteme zur Überwachung und Steuerung genutzt, die bisher nicht in einem großen Umfang im Energiesystem eingesetzt worden sind. Eine stärkere Vernetzung von Anlagen und die aktive Einbindung von dezentralen Erzeugungsanlagen und steuerbaren Verbrauchern erhöht die Möglichkeiten für gezielte Störung des Energiesystems.

Die Energieversorgungssicherheit genießt zu jedem Zeitpunkt in Deutschland, der EU und in Industrieländern weltweit stetige Aufmerksamkeit. In den vergangenen Jahren wurden hier besonders die Effekte von natürlichen Ereignissen auf die Resilienz des Energiesystems beobachtet, z. B. in Form von extremer Kälte, die in Kombination mit auftretenden Störungen zur Überlastung des Stromnetzes führte (z. B. Texas Power Grid Crisis 2021), oder in Form von extremer Hitze, Feuern und Dürre, die zu Störungen und Überlastungen im Netz führen [25]. Neben höherer Gewalt wird die Energieversorgung auch durch technische Störungen der Computer- und Steuersysteme (z. B. der US-Nordost-Blackout 2003) oder Marktmanipulationen (California Stromkrise) in ihrer Resilienz bedroht und entsprechend reguliert und überwacht.

Das Stromnetz ist jedoch auch Ziel von gezielten Cyberangriffen geworden, die einmal mehr verdeutlichen, welche Herausforderungen bestehen, wenn die Versorgungssicherheit in Form von hoher Verfügbarkeit und Resilienz sichergestellt werden will. Malware wie Stuxnet und Industroyer sind Beispiele für Software, die speziell sogenannte Industriesteueranlagen (engl. ICS) angreifen und ggf. sogar beschädigen oder zerstören sollen. Hier werden die größten Entwicklungen und auch Lücken, was den Schutz des Stromnetzes betrifft, beobachtet. Besondere Aufmerksamkeit sollte also hier auf die Umsetzung von Konzepten zur Herstellung von Cyberresilienz gelegt werden, welche die klassische IT-Sicherheit ergänzen müssen, sodass hohe Verfügbarkeit und Wiederherstellbarkeit trotz Cyberangriffen im Vordergrund stehen.

»Vernetzung und aktive Einbindung einer großen Anzahl an dezentralen Anlagen erhöht die Gefahr von gezielten Störungen.«

3 Trends der Digitalisierung

Digitalisierung hat in den letzten Jahren eine enorme Dynamik entwickelt und durchdringt unaufhaltsam alle Lebensbereiche. Prozesse werden effizienter und nachvollziehbarer, Kundenbedarfe werden mit jeder Anwendung besser erfasst und analysiert, neue Produkte schneller und zielgerichteter am Markt platziert und eine völlig neue Wertschöpfung entsteht. Andere Branchen zeigen, was konsequente Digitalisierung für Möglichkeiten eröffnet. Dabei lassen sich verschiedene Trends beobachten, die einen besonderen Einfluss auf die weiteren Entwicklungen der Energiewende haben können. Auf den folgenden Seiten sollen die wichtigsten Trends beschrieben werden.

Green IT

Der Strombedarf der Informations- und Kommunikationstechnik ist außerordentlich: 2017 lag er in Deutschland bereits bei 58 Terrawattstunde, das entsprach 2 Prozent des gesamten Strombedarfs [26]. Dieser enorme Strombedarf hat ein Bewusstsein geschaffen, dass es auch notwendig ist, IT und Software nachhaltig zu denken. Green IT beschreibt das Optimieren von IT hinsichtlich ihrer Umweltfreundlichkeit. Dabei werden alle Aspekte von IT berücksichtigt, wie z. B. den Betriebsort und das Layout von Datenzentren, die Virtualisierung von Serverhardware und deren Energieverwaltung, die Verwendung von recycling-freundlichen Monitoren und Druckern im Büro. Auch bei der Konzeptionierung von Software spielt Green IT eine Rolle, denn dort werden die positiven Auswirkungen auf die Umwelt gegenüber der schlechten aufgewogen. Ein Algorithmus, der die Lastflüsse in einem Bilanzkreis optimiert, muss also mindestens so viel Energie einsparen, wie Energie während der Laufzeit des Algorithmus verbraucht würde [27].

3.1 Datenräume

Zentrale Voraussetzung bei vielen neuen Technologien wie zum Beispiel Machine Learning ist die Verfügbarkeit großer Datensätze. Ein typischer Speicherort für große geteilte Datensätze sind Cloud Speicher. Cloud Infrastruktur hatte 2020 einen Umsatz von 142 Mrd. US Dollar mit einem Wachstum von 33 Prozent. Dabei teilen einige wenige Unternehmen den Markt unter sich auf: AWS hat einen Marktanteil von 31 Prozent, Azure 20 Prozent und Google 7 Prozent [28].

Die Datenhaltung erfolgt dabei zumeist zentral, wodurch sich Risiken hinsichtlich der Datensouveränität ergeben, da die Dateneigentümer keine Kontrolle über den Verbleib ihrer Daten haben. Die EU zeigt große Bestrebungen, dieses Problem mit eigenen Datenräumen zu lösen, die darauf abzielen, Dateneigentümer:innen volle Souveränität über ihre Daten zu gewähren.

Zwei Referenzarchitekturen sind dabei International Data Spaces (IDS) und das eng verwandte Gaia-X. Beide Systeme ermöglichen es, auf beim Dateneigentümer:innen, also dezentral, gehostete Daten, zuzugreifen. Die Zugriffssteuerung ist dabei feingranular pro Datennutzer:in und kann jederzeit durch die Dateneigentümer:innen verändert oder auch der Zugriff entzogen werden. Die Daten werden einheitlich beschrieben, um diese maschinenlesbar und durchsuchbar zu machen [29].

Die International Data Spaces Association stellt einen Opensource Code zur Verfügung, der den Einstieg und die Nutzung der IDS vereinfacht und diese allgemein zugänglich macht [30]. Im Rahmen einer vom Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK) geförderten Initiative GXFS-DE, werden GAIA-X Föderationsdiensten als Open Source Anwendungen implementiert und allgemein zugänglich gemacht [31].

3.2 Internet of Things

Industrie 4.0 hat die Digitalisierung von Produktion, Logistik und Produkten angetrieben, das Internet of Things (IoT) weitet die Digitalisierung auf weitere Bereiche aus. IoT beschreibt allgemein die Vernetzung von intelligenten Maschinen über das Internet. Dabei werden Haushaltsgeräte, wie Saugroboter oder Kühlschränke, ebenso mit intelligenten Funktionen ausgestattet wie Industrieobjekte, z. B. elektronische Zähler. Eine große Anzahl verteilter, kommunikativer Sensoren (bzw. IoT-Devices oder Edge-Geräte) kann als Schwarmintelligenz positive Mehrwerte schaffen. Im Bereich der Lokationsdienste werden bspw. anonymisierte Bewegungsmuster von Einzelgeräten zur Stauererkennung oder zur Objektverfolgung genutzt. Auch die in 2020 entwickelte Corona-Warn-App basiert auf IoT-Prinzipien, indem dezentral Sensordaten aufgenommen werden und in anonymisierter Form bei Bedarf (z. B. Warnung) mit anderen App-Nutzer:innen geteilt werden [32]. Im Zuge immer weiterer Digitalisierung spricht man auch vom »Internet of Everything« (IoE). Die so verfügbaren Sensordaten dieser Geräte können gewinnbringend für neue Technologien, z. B. künstliche Intelligenz verwendet werden [33, 468ff].

3.3 Cloud Computing

Cloud Computing beschreibt die Bereitstellung von Rechnerressourcen aus einem Pool von geteilten Ressourcen. Diese werden »as-a-Service« angeboten, das heißt sie können bei Bedarf flexibel gebucht und genutzt werden. Es gibt dabei verschiedene Ebenen für die Abstraktion und Virtualisierung der Rechnerressourcen [34, S. 27].

Bei »Infrastructure-as-a-Service« (IaaS) erhält der/die Nutzer:in Zugriff auf die Ressourcen eines virtuellen Rechenzentrums, wie bspw. Server, Router und Firewalls. Nutzer:innen von IaaS haben somit den Vorteil kein eigenes Rechenzentrum betreiben zu müssen, sondern jederzeit Rechnerressourcen anmieten zu können. Die Pflege der Hardware entfällt somit [34, S. 80].

Bei »Platform-as-a-Service« (PaaS) werden zusätzlich zur Virtualisierung von Rechnerressourcen auch Entwicklungs- und Laufzeitumgebungen virtualisiert, wie bspw. in Java- oder Docker-Containern. Die so zur Verfügung gestellten Plattformen erleichtern die Entwicklung neuer Anwendungen [33, S. 457, 34, S. 81].

»Software-as-a-Service« (SaaS) bezeichnet den Betrieb von standardisierten Anwendungen für Endbenutzer:innen, die ohne Installation zusätzlicher Software verwendet werden können. Die Lizenzierung erfolgt dabei zeit- oder nutzungsgebunden [33, S. 457, 34, S. 81].

3.4 Edge Computing

»Edge« (englisch für Rand, Kante) bezeichnet im Vergleich zur zentralen Cloud dezentrale Einzelknoten. Edge Computing beschreibt die Verlagerung der Datenverarbeitung von der Cloud hin zu den Endgeräten im Feld. So werden lediglich die Ergebnisse der vorverarbeiteten Daten in die Cloud versendet, bspw. werden nur die von Video-Analytics-Systemen erkannten Objekte anstelle der vollständigen Bilddaten an die Cloud übertragen. An diesem Beispiel ist erkennbar, welches enorme Einsparpotenzial hinsichtlich der zu übertragenden Daten Edge Computing verspricht. Daraus ergeben sich Vorteile wie deutlich schnellere Datenübertragung und Reduzierung der genutzten Netzwerkbandbreite [34, S. 53].

3.5 Distributed Ledger Technologies

Distributed Ledger Technologien (DLT) haben in den vergangenen zehn Jahren Bekanntheit in der breiten Öffentlichkeit durch ihren Einsatz in Kryptowährungen erlangt. In diesem Kontext bieten DLT eine dezentrale Datenhaltung für prinzipiell beliebige Daten. Innerhalb dieser dezentralen Datenhaltung wird die Integrität durch sogenannte Konsensmechanismen gesichert. Die Konsensmechanismen sorgen dafür, dass Einträge verifiziert werden und im Allgemeinen irreversibel Teil des Ledgers werden. Die bekannteste Kryptowährung, Bitcoin, verwendet eine Blockchain als öffentlichen Ledger. Innerhalb der Blockchain werden Transaktionen in pseudonymisierter Form archiviert. Die Autorisierung von Transaktionen erfolgt über kryptographische Schlüssel [35].

Der propagierte Vorteil von dezentralen Währungssystemen wie Bitcoin ist die Unabhängigkeit von einem zentralisierten Bankensystem und die Irreversibilität von Transaktionen. Auch im Kontext der Digitalisierung der Produktion (Industrie 4.0 und IoT) werden DLT eingesetzt, um die Sicherheit und Nachvollziehbarkeit von Produktionsketten abzusichern.

Kritisch bei DLT sind energieintensive Konsensmechanismen (Proof of Work) und Herausforderungen in der Skalierung. Für Bitcoin alleine wird ein globaler Energiebedarf in der Größenordnung großer deutscher Bundesländer beobachtet (Anti-Pattern zu Green IT) [36]. Umstellung auf andere Konsensmechanismen (bspw. Proof of Stake) im Bereich Kryptowährungen an mehreren Stellen wird verfolgt, ist aber noch nicht erfolgt.

3.6 Quantencomputing

Quanten-Computer bilden die voraussichtlich nächste Entwicklungsstufe von Rechenmaschinen nach Digitalrechnern (Computer). Analog zum binären Bit für klassische Computer, bildet das Quantenbit (Qubit) den elementaren Informationsträger für Quantencomputer. Während ein Bit sich lediglich im Zustand 0 oder 1 befindet, kann ein Qubit sich in Superposition beider Zustände befinden. Hierdurch steigt für mehrere Qubits die Menge an Zuständen und somit der Informationsgehalt exponentiell an, wohingegen dieser bei klassischen Computern nur linear wächst. So wären bereits für die in 500 Qubits gespeicherte Information mehr klassische Bits notwendig als die geschätzte Anzahl an Atomen im Universum [37].

Die wohl bekannteste Anwendung von Quantencomputing ist die Primzahlfaktorisation, welche das Lösen von asymmetrischen Verschlüsselungsfahren erlaubt. Anhand dieser wurde bereits 1994 durch die Entwicklung des Shor-Algorithmus das enorme Potenzial des Quantencomputings theoretisch nachgewiesen [2]. Für die praktische Umsetzung hatte es allerdings an einem physischen Quantencomputer gefehlt. Heute schreitet deren Entwicklung rasant voran, so konnte das Quantenvolumen (Metrik für Leistung und Performance) von 16 im Jahr 2019 auf 2048 im Jahr 2021 erhöht werden [38, 39]. Praktische Anwendungen stellen für diese Systeme der sogenannten verrauschten mittel-skalierten (noisy intermediate-scale quantum, NISQ) Quantenära jedoch immer noch eine Herausforderung dar. Um die hardwarebedingten Limitierungen zu überwinden, kommen daher moderne hybride Algorithmen wie der QAOA oder VQE zum Einsatz [40], welche neben Quanten- auch klassische Hardware nutzen. Diese erlauben die Erweiterung des Spektrums lösbarer Probleme, z. B. Optimierungsprobleme und eröffnen so vielfältige Anwendungsbereiche in der Industrie. So konnten in [41] bereits vielversprechende Ergebnisse für smarte Ladeverfahren von Elektrofahrzeugen erzielt werden und auch für die Automobilindustrie sowie für Prognosen und Analysen im Kampf gegen den Klimawandel wird großes Potenzial gesehen [42, 43].

3.7 Künstliche Intelligenz

Das Themengebiet der künstlichen Intelligenz (KI) befasst sich mit der Theorie und Entwicklung von Computersystemen, welche in der Lage sind, Aufgaben auszuführen, für die normalerweise menschliche Intelligenz erforderlich ist, z. B. visuelle Wahrnehmung, Spracherkennung, Entscheidungsfindung und Sprachübersetzung [44]. Unterschieden wird zwischen schwacher KI, die auf klar definierte Anwendungsfälle beschränkt ist und daher nicht oder nur schwer auf andere Probleme und Gebiete übertragen werden kann, und starker KI, die Verbindungen bereichsübergreifend erkennt und sich mit Problemen selbstständig auseinandersetzt. Während die Entwicklung einer starken KI ein aktives Forschungsfeld ist, kommt bei praktischen Anwendungen schwache KI zum Einsatz. Die Ansätze zur Entwicklung von KI lassen sich in traditionelle Ansätze (Expertensysteme und logische Systeme) sowie maschinelles Lernen kategorisieren. Insbesondere im Bereich des maschinellen Lernens wurden in den letzten Jahren durch gesteigerte Verfügbarkeit von Daten, algorithmischen Weiterentwicklungen und gesteigerter Rechenleistung signifikante Fortschritte erzielt. KI wird für verschiedene Problemstellungen, wie Bildverarbeitung (z. B. Bilderkennung, Autonomes Fahren, Sicherheitsmaßnahmen), Audioverarbeitung und Computerlinguistik (z. B. Spracherkennung, Informationsextraktion, Übersetzung), Anlagensteuerung und Robotik (z. B. Autonomes Fahren, Greifen von Objekten), Prognose, Entdecken, Planen (z. B. Bilden von Daten Gruppen, Objektklassifizierung, Vorhersagen von Werten, Erkennung Anomalien für die Betriebsüberwachung von Maschinen oder Cybersecurity) oder der Erstellung neuer Inhalte, eingesetzt [45, 46].

Künstliche Intelligenz hilft dabei Wissen aus Daten zu extrahieren, um dieses für Vorhersagen, Optimierungen oder Handlungsstrategien im lokalen oder globalen Energiesystem zu nutzen. Verwendet werden hierbei häufig Methoden des »Maschinellen Lernens«, welche sich in drei Hauptstränge aufteilen. Während beim »Unsupervised Learning« gelernt wird, Muster und Beziehungen in Daten zu detektieren, erzeugt »Supervised Learning« ein Klassifikations- oder Regressionsmodell, um Entscheidungen und Vorhersagen für eine spezifische Aufgabe zu treffen. Im »Reinforcement Learning« hingegen agiert ein Agent mit seiner Umwelt über eine Feedbackschleife, um selbstlernend sein Verhalten an neue Situationen anzupassen. Darüber hinaus werden verschiedene KI-Ansätze wie bspw. Federated Learning für Lernen auf verteilten Systemen, Transfer Learning oder Domain Adaption für die Übertragbarkeit von Modellen oder Multi Agent Reinforcement Learning zur Verknüpfung von Modellen in der Wissenschaft diskutiert und gelangen zunehmend in die Anwendung [47].

3.8 Digitale Zwillinge

Von einem Digitalen Zwilling wird gesprochen, wenn das Verhalten eines real existierenden Gegenstandes oder Systems digital abgebildet wird. Solche Modelle dienen zur Simulation, Vorhersage, Optimierung und Verifikation des realen Gegenstands und können während des gesamten Lebenszyklus genutzt werden. So können bspw. in der Entwicklungsphase, in der der reale Gegenstand oft noch nicht existiert, anhand eines Digitalen Zwillings Aussagen über das spätere Verhalten des Produkts gemacht werden und so die Qualität des Produkts beurteilt und verbessert werden.

Digitale Zwillinge bieten sich auch besonders zum Testen von Randfällen oder Extremsituationen an, die in der Realität nicht umgesetzt werden können. So können anhand von Digitalen Zwillingen von Stromnetzen Aussagen getroffen werden, wie sich das Stromnetz beim Ausfall großer Erzeugungsanlagen verhalten würde [34, S. 37].

3.9 Mobile Vernetzung

Unter den Kommunikationstechnologien nimmt das Mobilfunknetz aufgrund der hohen Netzabdeckung und der weiten Anwendung eine herausgehobene Rolle ein. Derzeit schreitet der 5G-Ausbau voran, seit Ende Oktober 2021 sind 53 Prozent der Flächen in Deutschland abgedeckt [48]. 5G ist seinem Vorgänger 4G dabei in vielerlei Hinsicht überlegen: Es hat geringere Latenzen, höhere Datenraten und ermöglicht eine höhere Anzahl angebundener Geräte. Nachteile sind die geringere Reichweite, der damit verbundene Bedarf an weiteren Sendemasten sowie die Notwendigkeit des Internet-Backbone-Ausbaus [34, S. 12-19]. Derzeit wird bereits an 6G, dem Nachfolger von 4G und 5G, geforscht. Ziel ist ein robustes Netzwerk aus land-, see- und luftgestützter Kommunikation, welche zehnmal mehr Geräte und 40-mal höhere Datenübertragungsraten im Vergleich zu 5G aufweist. Eine große Herausforderung ist dabei noch der hohe Energiebedarf von 6G, den es auch vor dem Hintergrund von Green IT zu reduzieren gilt [49, S. 22].

Außerhalb von Ballungszentren und der Netzabdeckung des Mobilfunknetzes sind Low Earth Orbit (LEO) Netzwerke eine Alternative, die seit einigen Jahren auch von wirtschaftlich agierenden Unternehmen verfolgt werden [50]. LEO-Netzwerke bieten satellitengestütztes Internet, das auch an den entlegensten Winkeln der Welt verfügbar ist. Im Vergleich zu LEO-Netzwerken der 90er, ist die eingesetzte Technik deutlich verbessert und die Herstellungskosten verringert worden. So werden sogenannte Megakonstellationen mit bis zu tausenden Satelliten eingesetzt, um ein Netzwerk aus Satelliten aufzuspannen und so eine lückenlose Netzabdeckung zu bieten. Diese Art von Netzwerk bietet geringe Latenzen und eine weltweite Versorgung mit Breitband-Internet [51].

Für batteriegetriebene IoT Anwendungen ist der Energiebedarf der genannten Technologien oft zu hoch. Speziell auf solche Anwendungen zielen »Low Power Wide Area-Networks«, wie »Long Range Wide Area Network« (LoRaWAN), ab. Weitere Charakteristika neben dem genannten geringen Energiebedarf sind eine große Reichweite, ein geringer Preis sowie die Skalierbarkeit der Systeme. Die Datenübertragungsrate ist bei solchen Systemen gering, üblicherweise im Bereich von mehreren zehn bis einigen hundert Kilobit pro Sekunde [52].

Zum Betrieb kritischer Infrastruktur wird mit dem 450 Megahertz-Netz [53] eine geschützte, nicht-öffentliche Infrastruktur für eine mutmaßlich ausfallsichere Kommunikation in der Energieversorgung aufgebaut. Nachrichten können mit unterschiedlichen Prioritäten behandelt werden, die Bandbreite reicht allerdings nicht für flächendeckende Echtzeitanwendungen bis in die Prosumer-Ebene.

3.10 Datenschutz und Privacy

Mit der zunehmenden Digitalisierung wurden Regularien und Verordnungen zur Umsetzung von Datenschutz unerlässlich. Im Folgenden werden die wichtigsten Verordnungen und Gesetze genannt.

Die Datenschutz-Grundverordnung (DSGVO) regelt vor allem die Sicherung des Datenverkehrs in Europa sowie den Schutz personenbezogener Daten. »Personenbezogene« Daten sind dabei sehr weit gefasst [54].

Der Digital Markets Act (DMA) soll mehr Wettbewerb schaffen und besonders große Digitalunternehmen, sogenannte »Gatekeeper«, daran hindern ihre Vormachtstellung im Markt auszunutzen. So müssten bspw. weit verbreitete Nachrichtendienste wie WhatsApp interoperable Schnittstellen für weniger verbreitete Nachrichtendienste zur Verfügung stellen. Bei Verstößen drohen drastische Strafen von 10 Prozent des Umsatzes [55].

Auch der Digital Services Act (DSA) zielt auf besonders große Digitalunternehmen ab, unter anderem auf Suchmaschinen, Online-Marktplätze und soziale Netzwerke. Diese müssen z. B. illegale

Inhalte bekämpfen oder Nutzerbeschwerden wirksamer umsetzen. Kleine Unternehmen sind von diesen Regelungen ausgenommen, je größer die Unternehmen desto mehr Regelungen müssen sie umsetzen [56].

Die Grundlage für ein europäisches Datenaustauschmodell soll mit Hilfe des Data-Governance Act (DGA) gelegt werden. Außerdem zielt der DGA darauf ab, die Entwicklung gemeinsamer europäischer Datenräume zu unterstützen. Diese Bereiche sollen unter anderem Energie, Mobilität sowie Daten der öffentlichen Verwaltung umfassen. Allgemein soll der Datenaustausch zwischen Sektoren und EU-Ländern erleichtert werden [57].

Im Zusammenhang damit soll der Data Act (DA) die Weitergabe und Nutzung von Industriedaten regeln, die von vernetzten Geräten gesammelt werden. Dabei sollen Datenmärkte geschaffen werden, um Nutzerdaten für Unternehmen und Industrieakteure sowie auch Behörden die Daten fremder Unternehmen zugänglich zu machen [58].

Mit dem Artificial Intelligence Act (AIA) soll ein regulatorischer und rechtlicher Rahmen für künstliche Intelligenz eingeführt werden. Dabei werden KI-Anwendungen in vier Risikogruppen unterteilt. Anwendungen mit geringem Risiko können ohne Einschränkungen genutzt werden, Anwendungen mit Risiko werden verboten [59]. Anwendungen, die kritische Infrastruktur, wie z. B. Energienetze, betreffen, werden als Hochrisikogruppe bewertet und müssen während der Entwicklung und des Betriebs enge Kontrollen bestehen [60].

Europäische Dimension - Regulatorik zur Digitalisierung

In diesem Abschnitt werden die wichtigsten europäischen Politiken, Rechtsakte und Strategien im Zusammenhang mit der Digitalisierung vorgestellt. Im Folgenden wird eine kurze Beschreibung dieser Politiken gegeben. Die Beschreibung deckt hauptsächlich Kernaspekte der laufenden Daten- und Digitalisierungspolitik ab und zeigt auf, wie diese mit dem Energiesektor verbunden sind. Um den Kontext zu verdeutlichen, wird auf Gesetzgebungsdokumente und -vorschläge verwiesen.

Digital Markets Act (DMA)

Online-Plattformen fungieren oft als Schnittstelle zwischen Unternehmen und Endnutzer:innen. Der DMA regelt den Wettbewerb zwischen relevanten Plattformdiensten und verpflichtet darüber hinaus zu fairem Wettbewerb für Gatekeeper und Transparenz auf den horizontalen und vertikalen Märkten. Zu diesen zentralen Plattformdiensten gehören Vermittlungsdienste (z. B. Marktplätze und App-Stores) [61]. Auch im Energiesektor entsteht eine Vielzahl digitaler Dienste und Plattformen. Auch diese werden durch den DMA reguliert, um die Wettbewerbsfähigkeit für neue Marktteilnehmende zu erhalten.

Digital Services Act (DSA)

Der DSA schützt und regelt die grundlegenden Rechte der Verbraucher:innen in einem Online-Marktraum. Außerdem schützt er den digitalen Raum vor unethischen Inhalten, illegalen Waren und Dienstleistungen sowie vor gezielter Werbung. Um dies zu erreichen, müssen bestimmte Verpflichtungen von zwischengeschalteten Akteur:innen eingehalten werden, darunter bspw. die Transparenzberichterstattung, die Zusammenarbeit mit den nationalen Behörden auf Anweisung und die Anforderungen an die Nutzungsbedingungen, die den Grundrechten Rechnung tragen müssen [61]. Im Zusammenhang mit dem Energiesektor ist die DSA in der Lage, digitale End-to-End-Dienste zu regulieren, die über das Internet oder Online-Plattformen angeboten werden. Außerdem unterstützt sie Konzerne und kleine und mittlere Unternehmen bei der Einrichtung und Skalierung von EU-weiten digitalen Energieplattformen.

Data Governance Act (DGA)

Die DGA sind ein wichtiger strategischer Pfeiler der EU-Datenstrategie und sollen das Vertrauen in die gemeinsame Nutzung und Verfügbarkeit von Daten stärken. Außerdem schafft sie die Grundlage für Datenaustauschdienste und Datenaltruismus. Die DGA versprechen, eine Governance und ein Regelwerk zu schaffen, um die Herausforderungen der technischen Barrieren und der Wiederverwendung von Daten zu überwinden. Außerdem soll sie sich an der Schaffung und Entwicklung gemeinsamer europäischer Datenräume in strategischen Schlüsselbereichen orientieren, die sowohl private als auch öffentliche Akteure in Bereichen wie Gesundheit, Umwelt, Energie, Landwirtschaft, Mobilität, Finanzen, Fertigung, öffentliche Verwaltung und Qualifikationen einbeziehen [62].

Data Act (DA)

Der Data Act ergänzt die im November 2020 vorgeschlagene Data Governance-Verordnung. Er fördert eine faire und innovative datengesteuerte Wirtschaft und bietet einen rechtlichen Rahmen für Unternehmen und Betriebe, um Daten zu teilen. Außerdem stimuliert das Gesetz einen wettbewerbsfähigen Datenmarkt und innovative Dienste und strebt einen freien Datenmarkt für nicht-personenbezogene Daten an. Darüber hinaus erleichtert es die gemeinsame Nutzung

von Daten im Rahmen von Geschäftsbeziehungen zwischen Unternehmen und Behörden, welche über die bestehenden Wege oft ineffizient ist. Daten haben im Energiesektor einen bedeutenden Wert. Das Datengesetz würde Grundregeln für die gemeinsame Nutzung und Übertragbarkeit von Daten im Energiesektor festlegen. Drittanbieter könnten den Zugang zu Daten aus verschiedenen Quellen privilegieren, um den Endverbrauchenden digitale Dienstleistungen/Lösungen anzubieten [63].

Artificial Intelligence Act (AIA)

Dieser Rechtsakt regelt den Rahmen und die Entwicklung der künstlichen Intelligenz in den EU-Mitgliedstaaten. Das grundlegende Ziel dieses Rechtsakts ist es, die sichere, vertrauenswürdige und rechtmäßige Umsetzung von KI-bezogenen Diensten in der EU zu gewährleisten. Außerdem erleichtert er den Binnenmarkt für KI-Dienste, Investitionen und Innovationen in KI-Systeme [64].

KI-Modelle und -Systeme spielen eine wichtige Rolle in der Energieversorgungskette. Tatsächlich sind eine Reihe von KI-gestützten Dienstleistungen und Produkten in verschiedenen Phasen (z. B. Endverbrauchende, Erzeugung und Übertragung) der Energieversorgungskette bereits gut platziert. Dieser spezielle Rechtsakt bietet Energieunternehmen, Versorgungsunternehmen und kleine und mittlere Unternehmen Leitlinien für die Einführung und Integration eines rechtsgültigen KI-Systems in ihren Geschäftsprozess.

Open data and the re-use of public sector information (recast)

Es fördert den Austausch von öffentlichen Daten (z. B. von Energieversorgern) über eine digitale Datenplattform, die kostenlos genutzt werden kann. Außerdem ermöglicht sie die Wiederverwendung von Daten zur Entwicklung neuer Energiedienstleistungen, -produkte und -anwendungen. Darüber hinaus ermutigt es Energieunternehmen, Versorgungsunternehmen und Stromerzeuger, eine offene Datenplattform einzurichten [65].

EU Cybersecurity Strategy

Diese Strategie gewährleistet die Widerstandsfähigkeit kritischer Infrastrukturen, die Dienstleistungen erbringen, die für das reibungslose Funktionieren des Binnenmarktes und für das Leben und den Lebensunterhalt der europäischen Bürger:innen unerlässlich sind. Im Kontext des Energiesektors wird mit der Cybersicherheitsstrategie ein gemeinsamer Rahmen für die Netz- und Informationssicherheit (NIS 2.0) für Stromerzeuger, Marktbetreiber, Aggregatoren, Demand Response und Energiedienstleistungen umgesetzt. Dazu gehören auch Wärme- und Kältenetze [66].

Regulation on establishing the European High Performance Computing (Draft proposal)

Die europäische Regulierung des Hochleistungsrechnens (HPC) zielt auf die Modernisierung der bestehenden Infrastruktur ab. HPC-Systeme ermöglichen datengesteuerte Innovationen (z. B. Big-Data-Analytik, Hyperautomation, etc.) [67]. Im Energiesektor würden HPC-Systeme durch die Bereitstellung fortschrittlicher digitaler Konnektivität zur Vernetzung verschiedener Infrastrukturen und Anlagen beitragen. Darüber hinaus können Energieunternehmen damit datenintensive KI- und maschinelle Lernmodelle entwickeln.

Smart Readiness Indicator (SRI) for Buildings

Hierbei handelt es sich um eine Methodik zur Bewertung der digitalen Bereitschaft von Gebäuden in der EU. Sie bietet eine gemeinsame Definition und ein Zertifizierungssystem für die Smart Readiness von Gebäuden [68]. SRI fördert die Digitalisierung von Energiedienstleistungen in Gebäuden und steht in engem Zusammenhang mit den digitalen Aggregations- und Flexibilitätsdiensten in der Energiewertschöpfungskette.

Common European Data Spaces (working proposal)

Dieser Vorschlag beschleunigt die Einrichtung gemeinsamer (offener) Datenräume, um die Übertragbarkeit und Interoperabilität von Daten zu gewährleisten. Der Vorschlag umfasst eine Reihe von strategischen Sektoren und Bereichen. Solche Datenräume werden einen einfachen und sicheren Zugang zu Daten ermöglichen, um Innovationen und neue Geschäftsmodelle zu testen. Im Rahmen des Energiesektors wird ein gemeinsamer europäischer Energiedatenraum vorgeschlagen, um den digitalen Datenaustausch zwischen Unternehmen und Versorgungsunternehmen zu stärken und neue Anwendungsfälle zum Nutzen des grünen Übergangs und der Digitalisierung zu entwickeln [69].

Renewable Energy Directive (RED III)

Die neu eingeführte RED-III-Richtlinie ist eine wichtige politische Initiative, um den Übergang zu einem Netz für 100 Prozent erneuerbare Energien zu ermöglichen. Sie fördert die Systemintegration von erneuerbaren Energien auf digitale Weise. Sie schreibt die Ausstellung von Herkunftsnachweisen verbindlich vor und sorgt für Transparenz unter den Beteiligten. Darüber hinaus betont RED III den elektronischen Austausch von Daten, wie z. B. EV-Ladepunkte, Standorte von Heiz- und Kühlsystemen, Gebäudeenergiemanagement und Daten von Aggregatoren, usw. [70].

European Interoperability Framework (EIF)

Die EIF-Leitlinien sind eine Reihe von Empfehlungen zur Erreichung von Interoperabilität auf den verschiedenen Ebenen der Geschäftsprozesse. Im EIF-Rahmen werden verschiedene Interoperabilitätsebenen (z. B. Organisation, Technik, Information) eingeführt, um den freien Datenfluss in digitalen End-to-End-Diensten zu rationalisieren. Es unterstützt die schnelle Anpassung von Open-Source-Softwaretechnologien, Datenbanken und Produkten, um einen Lock-in-Effekt zu vermeiden [71]. Der Energiesektor ist im Zusammenhang mit der Interoperabilität von Technologien und Informationen von großer Bedeutung. In diesem Sinne würde der EIF dazu beitragen, die Interoperabilität auf jeder Stufe der Wertschöpfungskette für Energiedienstleistungen umzusetzen.

4 Stand der Digitalisierung des Energiesystems

Aus den zunächst getrennt betrachteten Entwicklungen und Trends bei der Energiewende und der allgemeinen Digitalisierung konnten in verschiedenen Workshops fünf Handlungsfelder identifiziert werden, die besonders hohe Chancen für eine stärkere Digitalisierung darstellen und besondere Aufmerksamkeit verlangen: Datenökonomie, Sektorenkopplung, der vernetzte Anlagenbetrieb, Netzbetrieb und –Planung, sowie Cybersecurity. Grundlegender Bewertungsmaßstab ist die Zielerreichung der Dekarbonisierung bis 2045, also Minimalanforderungen an eine Digitalisierung, ohne die die Zielerreichung der Energiewende unwahrscheinlich erscheint.

Zwei Herausforderungen sollen hier einleitend behandelt werden, die nicht in diese Kategorien passen, aber einen großen Einfluss auf die bisherige und weitere Entwicklung haben: Einerseits die Digitalisierung von Prozessen, an denen Behörden beteiligt sind und andererseits die Qualifizierung und der Arbeitsmarkt.

Digitalisierung von Unternehmen, Behörden und Prozessen

Unternehmen wappnen sich für die digitale Transformation. Laut [72] hatten 2021 über die Hälfte der Energieversorger und Netzbetreiber eine Digitalisierungsstrategie. Zudem wirkte die COVID-19-Pandemie wie ein Katalysator für die digitale Transformation in der Energiebranche. Unternehmen mussten ihre Prozesse neu ausrichten und Digitalisierungsinitiativen wurden in kürzester Zeit umgesetzt. So wurde das Bewusstsein für die Notwendigkeit von Digitalisierung geschärft und das enorme Potenzial der Digitalisierung sichtbar [73]. Unternehmen erwarten heutzutage eine Veränderung der Wertschöpfung sowie steigende Umsatzerwartungen an digitale Produkte, bspw. für Angebote dezentraler Erzeugungsanlagen (z. B. Automatisierung oder Alternativlösungen für bürokratische Prozesse zur Marktteilnahme von Anlagen), automatisierten Stromhandel, Wechsel zwischen Vermarktungsoptionen, Smart City IT, E-Mobilität sowie Energiemanagementlösungen für Kommunen und Industrieunternehmen. Darüber hinaus bietet der Bereich Smart City IT und E-Mobilität zahlreiche Optionen für digitale Produkte und Dienstleistungen (z. B. Infrastruktur für integrierte Kommunikationsplattformen und dezentrale Erzeugungsanlagen, One-Ticket-Ansatz für Mobilitätsoptionen, Roaming-Plattformen, Sharing-Dienste, Wallboxen, mobile Apps und Ladesäulenbuchungen), die in Summe bereits ein fester Bestandteil vieler Unternehmen in der Praxis sind. Ein Großteil der Unternehmen im Energiesektor konnte zudem bereits Kostensenkungen durch Digitalisierung bspw. mithilfe digitaler Optimierung verzeichnen [72]. Bei Energieversorgungsunternehmen »schlummern« zudem große Effizienzgewinne bei den Kernprozessen der Energiewirtschaft, wie z. B. bei der Verarbeitung von Zählerdaten, bei Abrechnungen und Self-Service-Portalen [73]. Verbesserungspotenziale liegen auch bei der Anwendung von KI für digitale Assistenzsysteme, datengestützte Abwanderungsprognosen und -prävention, sowie grundlegender Datenpflege, digitaler Vertriebsunterstützung oder der Digitalisierung regulierter Prozesse [72].

Die Digitalisierung von Prozessen hat dabei an Relevanz gewonnen. Automatisierte Prozesse verbessern die Effizienz und damit die Wettbewerbsfähigkeit der Unternehmen. Große Unternehmen haben gegenüber kleinen und mittleren Unternehmen oft einen Vorsprung bei dem Thema Prozessdigitalisierung. Klein- und mittelgroße Unternehmen sind allerdings oft agiler und besitzen schlankere und weniger komplexe Prozesse. Im Bereich der Netzinfrastruktur betrifft das bspw. die Automatisierung der Netze, analytisch gestützte Bauplanung, Automatisierung im Workforce-Management, Gutschriftsprozesse für Subunternehmer, die Nutzung von Drohnen für Aufnahmen und Analysen, sowie Self-Service Business Intelligence für regelmäßige selbstständige Erstellung von Geschäftsberichten und Analysen [72].

Die Möglichkeiten durch die Digitalisierung bei Behörden und der öffentlichen Verwaltung werden nicht genutzt. Die COVID-19-Pandemie hat den Nachholbedarf offengelegt. Ohne Modernisierung und Digitalisierung, die für schnellere und einfachere Abläufe enorme Potenziale bieten, fehlen den Behörden die benötigten Kapazitäten, um die Energiewende zu beschleunigen und die notwendigen Prozesse zu realisieren (z. B. für die Digitalisierung von Planungs- und Genehmigungsprozessen für den Netzausbau) [74]. Insgesamt ist eine konsequente und nicht nur eine punktuelle Digitalisierung energiewirtschaftlicher Unternehmen, Behörden, Prozesse, Wertschöpfungsstufen und Akteur:innen nötig.

Digitalisierungskompetenz

Digital- und Datenkompetenz gewinnt in allen Bereichen zunehmend an Bedeutung. Laut [74] ist die digitale Kompetenz in der Energiewirtschaft ausbaufähig. Das bestehende Personal von (insbesondere kleinen und kommunalen) Behörden und Energieversorgungsunternehmen (EVU) kann nicht in ausreichender Geschwindigkeit so weitergebildet und ausgebaut werden, dass eine vollständig ausreichende Kenntnis zur Anwendung der Digitalisierung vorhanden ist. Deshalb muss dort Kompetenzbündelung erfolgen, z. B. auf zentralen Ansprechpartnern, die mindestens die ausreichenden Grundkenntnisse besitzen (Digitalisierung allgemein, Cybersicherheit, Möglichkeiten von modernen Methoden wie KI).

Nur die Hälfte der Unternehmen bot ihren Mitarbeitenden 2021 digitale Unterstützung für Onboarding, Schulungen, Self-Service oder Weiterentwicklung via E-Learning. Zudem fehlte es an Kompetenz und Mitarbeitendenqualifikationen im Bereich Datenanalyse und KI, sodass die Potenziale für die Unternehmen durch bspw. prädiktive oder präskriptive Analysen, analytische Optimierung, Optimierung auf Basis historischer Daten oder Predictive Maintenance nicht ausreichen erschlossen werden. Zudem verändern sich die Rollen im Unternehmen im Zuge der Digitalisierung deutlich, was zu neuen Kompetenzanforderungen bei den Mitarbeitenden und dem Management führt [73]. Des Weiteren ist der Austausch und die Zusammenarbeit mit Akteur:innen relevant, die tiefergehende Digitalisierungskompetenz besitzen (z. B. Forschungseinrichtungen, Technologie- und Digitalisierungs-Start-Ups sowie Hersteller von steuerbaren Energieanlagen wie E-KFZ, Wärmepumpen, Smart Home-Anwendungen). Diese Entwicklungen sind schon im Gange, aber noch nicht überall ausreichend fortgeschritten. Digitale Kompetenzen müssen zudem verstärkt in der Ausbildung und Weiterbildung für die Energiewirtschaft gefördert werden, da sich ein Mangel an Fachpersonal für digitalisierte Systeme (bspw. für digitale Netze, sektorenübergreifende digitalisierte Planung und Betrieb usw.) abzeichnet.

4.1 Datenökonomie

Mit rasant steigenden Datenmengen gewinnt auch das ökonomische Potenzial von Daten immer mehr an Relevanz. Fortschreitende technische Möglichkeiten zum Messen, Speichern und zur Analyse von Daten befeuern neue digitale Geschäftsmodelle. Die Kompetenz im Umgang mit Daten und Algorithmen wird zum Faktor für die Wettbewerbsfähigkeit von Unternehmen, womit die volkswirtschaftliche Bedeutung insgesamt steigt. Die Verfügbarkeit von Daten ist somit eine essenzielle Voraussetzung für die Digitalisierung der Energieversorgung. Der Austausch von Daten zwischen den Marktakteuren ist oft unzureichend und beschränkt sich meist auf die regulatorischen Vorgaben, sodass das Potenzial für innovative Lösungen nicht genutzt wird. Für die Darstellung des aktuellen Standes der Datenökonomie in der Energiewirtschaft wird in den folgenden Abschnitten das regulatorische und rechtliche Umfeld, der aktuelle Datenaustausch in der deutschen Energiewirtschaft, sowie Datenräume als Verknüpfungspunkt für neue Wertschöpfungsnetzwerke genauer betrachtet. Zusätzlich zu dem hier betrachteten Datenaustausch besteht eine

Vielzahl an bilateralen Datenaustauschen in der Energiewirtschaft, die hier allerdings nicht näher betrachtet werden.

Regulatorisches und rechtliches Umfeld zur Marktkommunikation

Bisheriger Datenaustausch in der Energiebranche ist sehr stark durch Regularien und Vorgaben geprägt. Im Rahmen der Marktkommunikation zwischen Marktteilnehmenden finden die regulatorischen Prozessdokumente der Wechselprozesse im Messwesen (WiM), Geschäftsprozesse zur Kundenbelieferung mit Elektrizität (GPKE), Marktprozesse für erzeugende Marktlösungen Strom (MPES) und Marktregeln für die Durchführung der Bilanzkreisabrechnung Strom (MaBiS) Anwendung. In diesem Zusammenhang werden durch geeignete Backendsysteme (z. B. die Marktkommunikationstools und zugrundeliegende Vorabprozesse sowie zugehörige Tools für z. B. die Bilanzierung, Lieferantenwechsel etc.) über standardisierte EDIFACT-Nachrichten, Daten und Informationen ausgetauscht.

Da intelligenten Messsysteme der ersten Generation eine sternförmige Verarbeitung und Verteilung von Messwerten aus dem Smart Meter Gateway (SMGW) heraus technisch noch nicht abbilden können, sind hier geeignete Backendsysteme zum Empfangen, Plausibilisieren, Anreichern und Versenden nötig. Die Rechtslage zur Erfassung dieser Daten ist im Messstellenbetriebsgesetz (MsbG) geregelt. Die Bundesnetzagentur (BNetzA) und das Bundesamt für Sicherheit in der Informationstechnik (BSI) sind in diesem Zusammenhang die maßgebenden Regulierungsbehörden hinsichtlich Umsetzung der gesetzlichen Vorgaben. In diesem Zusammenhang sind vom BSI Mindestanforderungen zu Schutzprofilen und technischen Richtlinien erarbeitet und veröffentlicht worden, welche die grundlegenden Anforderungsdetails beschreiben und festlegen [75, 76].

Aktueller Datenaustausch in der deutschen Energiewirtschaft

Im Rahmen der Digitalisierung und aufgrund der regulatorischen Transparenzvorgaben der Energiewende werden auf unterschiedlichen Ebenen digitalisierte Daten und Informationen ausgetauscht. Dabei sind vorrangig zwei Bereiche interessant. Einmal die technische Ebene, also z. B. die Kommunikation von Gerätedaten mit und über das SMGW. Zum anderen die regulatorische Ebene zur Kommunikation von Daten zwischen einzelnen Marktakteuren im liberalisierten Energiemarkt.

Mit Hilfe einer Umfrage identifizieren Seim et al. [77] einschränkende Faktoren bei den derzeit verfügbaren Plattformen. So liegen Informationen meist nicht in der benötigten Auflösung vor oder sind sehr heterogen und nicht maschinenlesbar.

Daten werden meist in den bekannten Sektoren Strom, Gas oder Wärme aufgenommen, verarbeitet und zur Verfügung gestellt. In Verbindung mit einem sehr abgegrenzten Projektfokus werden folglich Datensilos erschaffen, die keinen einfachen Austausch der Daten und somit eine Verknüpfung und Potenzierung des Werts ermöglichen. Ein aktuelles Beispiel hierfür ist die Plattform »Connect+«. Auf dieser Plattform arbeiten die deutschen Netzbetreiber zusammen, um notwendige Informationen für das Engpassmanagement (Redispatch 2.0) auszutauschen [78]. Wie auch die aktuelle Studie der dena zum Thema feststellt, ist fraglich, ob mit Connect+ ein offener und innovativer Datenaustausch möglich ist oder ob es bei einer Silolösung bleibt [79].

»Die Bedeutung von Daten und deren ökonomischer Potenziale steigt, doch viele Möglichkeiten und Chancen bleiben aktuell noch ungenutzt.«

Datenräume als Verknüpfungspunkt für neue Wertschöpfungsnetzwerke

Zur Umsetzung einer florierenden digitalen Datenökonomie bedarf es einer einfachen und sicheren Möglichkeit des Datenaustauschs. Eine Basis hierfür bilden technologische Grundbausteine für den Aufbau eines Datenraums. Hier wurden von unterschiedlichen Organisationen Konzepte und erste Bausteine entwickelt, die als Grundlage für alle bisherigen Umsetzungen dienen.

Die Initiative »International Data Spaces« wurde Ende 2014 von der Fraunhofer-Gesellschaft initiiert, mit dem Ziel, einen sicheren und souveränen Datenaustausch zu ermöglichen. Durch organisatorische und technische Maßnahmen ermöglicht die IDS-Referenzarchitektur Datengebern das Teilen ihrer Daten entlang der gesamten Wertschöpfungskette unter Wahrung der Datensouveränität. Zur Verbreitung und Weiterentwicklung der IDS wurde die »International Data Spaces Association« (IDSA) gegründet, welche bisher bereits über 110 Organisationen angehören, um die entwickelten Technologien für ihre Anwendungsfälle und Geschäftsprozesse zu nutzen. Die IDS-Architektur [80] als branchenneutrale IT-Lösung wird derzeit in verschiedenen Branchen jeweils zu spezifischen Lösungen vertikalisiert. Dies wird von den jeweiligen Akteur:innen und Anwendungsfällen vorangetrieben.

Alternativ stellt die Gaia-X-Referenzarchitektur eine weitere Möglichkeit dar, dezentral gespeicherte Daten in einem umfassenden Ökosystem auszutauschen [81]. Zusammen mit Fiware und der Big Data Value Assoziation, entwickeln IDSA und Gaia-X aktuell die wichtigste Erneuerung im Bereich der digitalen Ökosysteme. Alle vier Organisationen, haben sich zu der Data Space Business Alliance (DSBA) zusammengeschlossen, um das Aufbauen von Datensilos zu verhindern und einen Austausch zwischen den jeweiligen Technologien zu ermöglichen [82].

Auf Basis der Empfehlungen des DSBA entwickelt das europäische Projekt Omega-X einen Energiedatenraum zum Austausch von Daten auf Basis von Datenräumen. Dabei steht die Datenverarbeitung nach europäischen Werten mit Hilfe von einer dezentralen Datenspeicherung und Datensouveränität im Vordergrund. Gleichzeitig soll demonstriert werden, dass die Mehrwertpotenziale der Daten trotzdem genutzt werden können [83].

Ein weiteres Projekt, ist das EU-Horizon 2020-Projekt Platoon [84]. Dieses startete bereits im vergangenen Jahr, verwendet die IDS-Technologie und demonstriert mit Hilfe von sieben Pilot-Anwendungen den effizienten Datenaustausch für produktive Use-Cases. Auch Fraunhofer führte mit dem Projekt EnDaSpace eine erste Machbarkeitsuntersuchung des Konzepts der Datenräume durch. Hier wurde mit Hilfe eines Prototyps die Funktionsweise der Technologie evaluiert und anhand von einem Wasserstoff-Use-Case praktisch dargestellt [85].

Die drei genannten Projekte sind eine Liste von Beispielen, die durch weitere Projekte fortgeführt werden kann. Daran ist das hohe Interesse an Datenräumen erkennbar, das aktuell in der Energiewirtschaft und in anderen Branchen, wie zum Beispiel der Fertigung, beobachtet werden kann. Datenräume bieten ein hohes Potenzial, den digitalen Herausforderungen der kommenden Jahre zu begegnen und Daten im Einklang mit europäischen Werten zu verarbeiten, ohne auf die Wertschöpfung zu verzichten.

4.2 Sektorenkopplung

Die Sektorenkopplung umfasst die Wandlung und Speicherung von Energie und Stoffen zwischen den Sektoren Strom, Wärme, Gas, Verkehr und Industrie. Der Einsatz von Technologien zur Sektorenkopplung ermöglicht die Nutzung von Synergieeffekten zwischen erneuerbar erzeugten Energien und dem Energieverbrauch und somit die Flexibilisierung des Energiesystems. Aus Sicht der Digitalisierung sind die derzeit relevantesten Kopplungspunkte der Sektoren Power-to-Mobility, Power-to-Heat und Power-to-Gas. Einige Sektorenkopplungstechnologien sind technologisch bereits ausgereift und verbreitet, so z. B. Wärmepumpen für Power-to-Heat und das grundlegende Laden von Elektrofahrzeugen für Power-to-Mobility. Bei diesen ist die aktuelle Forschung primär auf die Systemintegration bezogen, für die die digitalisierte Steuerung eine wichtige Rolle spielt. Andere Technologien, wie bidirektionales Laden (insbesondere Vehicle-to-Grid) für Power-to-Mobility, haben schon einen hohen technischen Reifegrad, sind aber kaum verbreitet, weil es verschiedene regulatorische Hürden und Unklarheiten gibt. Diese müssen mitunter abgebaut werden, was teilweise bereits geschieht z. B. durch den Wegfall der EEG-Umlage, die zuvor eine Doppelbelastung für dezentrale Speicher darstellte. Andererseits können durch Digitalisierung auch einige regulatorische Vorgaben erst eingehalten und so die Integration der Technologien in das Energiesystem ermöglicht werden. Technologien, wie Elektrolyse und Rückverstromung von Wasserstoff für Power-to-Gas, sind prinzipiell vorhanden, aber haben noch weiteren technologischen Entwicklungsbedarf. Dennoch muss auch bei diesen bereits an einer digitalisierten Integration in das Energiesystem gearbeitet werden [86]. Der Stand der Digitalisierung an den relevantesten Kopplungspunkten wird in den folgenden Abschnitten vertieft.

»Die Digitalisierung der Sektorenkopplung muss deutlich vorangetrieben und Hürden bewältigt werden, um die Potenziale dieser Schlüsseltechnologien für die Energiewende voll auszuschöpfen.«

Elektromobilität

Laut BMWK waren 2021 mehr als 70 elektrische Fahrzeugmodelle deutscher Hersteller auf dem Markt und rund 46.200 öffentlich zugängliche Ladepunkte standen für das Beladen mit Strom zur Verfügung. Im Jahr 2020 wurden 389.000 Elektrofahrzeuge neu zugelassen, während es 2021 bereits 681.000 Neuzulassungen waren [87]. Der Hochlauf der Elektromobilität ist hinsichtlich der Neuzulassungen und der technologischen Entwicklungen sehr dynamisch. In Bezug zur Digitalisierung sind derzeit insbesondere die Kommunikation mit der Ladeinfrastruktur, Steuerungs- und Kommunikationsfunktionalität, Kundenorientiertheit und die Netzintegration von Elektromobilität von Interesse. Auf die Kund:innen zugeschnittene digitale Lösungen, die die Kundenanforderungen Richtung Ladedauer, Komfort, Sicherheit, Reichweite, Preis und Zusatzangebote adressieren, sind für die Zukunft der Elektromobilität relevant, aber werden bisher nicht ausreichend umgesetzt. Diese sind wichtig, um Akzeptanz, Verbreitung und eine effiziente sowie zielführende Netzintegration der Elektromobilität zu erreichen [88].

Um diese erfolgreich in das Energiesystem zu integrieren, ist jedoch möglichst große Interoperabilität und umfangreiche Kommunikation mit Lademanagement-Systemen notwendig. Die Interoperabilität wird teilweise dadurch eingeschränkt, dass einige Hersteller proprietäre Systeme betreiben. So unterstützen bspw. nur wenige E-Fahrzeug-Modelle und Ladesäulen die standardisierte komplexe Kommunikation nach ISO 15118, die benutzerfreundliche und sichere Schnittstellen zwischen dem Elektrofahrzeug und einer Ladestation ermöglichen soll. Verwenden diese an-

dere Kommunikationsmöglichkeiten ist die Kommunikation mit Management-Systemen nur eingeschränkt möglich. Die Standardisierung einer Schnittstelle für die Anbindung von Ladestationen als angeschlossener Verbraucher und Erzeugungseinrichtung an ein lokales intelligentes Leistungs- und Energiemanagement fehlt derzeit. (3) Ein zeitnahe Abschluss der technischen Arbeiten an ISO 15118-20 und an der Smart Meter Gateway Zertifizierung ist daher anzustreben und ein Fokus auf die Funktionalität der Steuerbarkeit inklusive Klärung der Verfügbarkeit der Technologien zu legen. Dessen Umsetzung ist noch nicht erreicht, aber in Arbeit. Eine technologieoffene und zeitnahe Klärung der Sicherstellung einer technischen Steuerbarkeit bzw. Flexibilisierung ist allerdings noch offen [89].

Wärmeversorgung

Durch die Digitalisierung der Energiewirtschaft und Wärmeversorgung kann die Gesamteffizienz des Systems verbessert und die Integration von erneuerbaren Quellen erleichtert werden. Im Vergleich verschiedener Energiesektoren sind Digitalisierungsprozesse derzeit im Bereich Strom weiterentwickelt als in der Wärmeversorgung.

In der Wärmeversorgung für Endnutzer:innen werden Geräte der neuen Generation, z. B. Wärmeerzeuger (wie Kessel oder Wärmepumpen) mit einer entsprechenden Kommunikationseinheit für eine Verbindung zum Clouddatensystem des jeweiligen Herstellers ausgeliefert. Diese Schnittstellen werden bspw. für die Analyse der Anlage genutzt. Eine übergreifende Datenauswertung erfolgt in der Regel nicht. Für größere Einheiten in z. B. Liegenschaften wird in der Regel eine umfassende Datenanbindung umgesetzt. Wärmemengenzähler mit entsprechender Intelligenz sind marktverfügbar und werden für Abrechnungszwecke und zur Optimierung des Betriebes eingesetzt. Doch auch hier wird eine umfassende Nutzung der Daten in der Regel nicht durchgeführt.

Die Einführung und Nutzung moderner Kommunikationsstrukturen in der Energietechnik ist eine wichtige und dringende Aufgabe in der Fernwärmewirtschaft. In der Regel weisen Fernwärmesysteme einen eher geringen Grad der Digitalisierung auf. Notwendig ist die Erweiterung bzw. Umstellung der bestehenden Strukturen, da Versorgungssysteme für Wärme und Strom zukünftig deutlich dezentraler ausgerichtet sein werden. Wesentlicher Impuls für diese Tendenz ist die laufende Transformation des Energiesystems, in dem kleinere, verteilt agierende Erzeugungssysteme und die Nutzung von Flexibilitäten von Abnehmern eine zentrale Rolle einnehmen werden. Die systemische Regelung und Steuerung der energetischen Versorgungsstrukturen setzt jedoch eine geeignete Kommunikation und Signalverarbeitung voraus. Im Zuge der Dekarbonisierung der Fernwärmesysteme werden die bisher meist zentralen Strukturen, einer Transformation hin zu dezentralen Systemen, mit der Notwendigkeit einer digitalen Vernetzung der Anlagen, unterzogen. Fernwärmesysteme werden hierbei bspw. um Großwärmepumpen, solarthermische Erzeuger und kleinere Kraft-Wärme-Kopplungsanlagen (KWK) erweitert.

Weiter werden niedrige Systemtemperaturen sowie diversifizierte und sektorengekoppelte Erzeugungseinheiten (z. B. KWK, Power2Heat, Wärmepumpen) angestrebt. In diesem Kontext führt die Digitalisierung in Kombination mit geeigneter Sensorik zu einer besseren Kenntnis des Wärmebedarfs, einer Zustandserkennung im Wärmenetz, sowie einem intelligenten und vorausschauenden Wärmespeicher- und Erzeugermanagement. Dies ist erforderlich, um die bestehenden Fernwärmesysteme weiterzuentwickeln sowie deren zukunftssicheren Betrieb und neue Geschäftsmodelle zu ermöglichen.

Digitale nutzerzentrierte Geschäftsmodelle

Besonders relevant für die Energiewende sind angesichts von dezentraler und volatiler Erzeugung solche Geschäftsmodelle, die eine Flexibilisierung des Stromverbrauchs anstreben. Dies macht die

Bereiche Sektorenkopplung (inkl. Elektromobilität), flexible Stromtarife, intelligentes Energiemanagement und »Energy Communities« besonders interessant. Für Großverbraucher ist die Umsetzung entsprechender Modelle einfacher und auch schon verbreitet, doch vor allem für Haushaltskund:innen ist dies bisher schwer. Hier bietet die Digitalisierung Möglichkeiten für digitale nutzerzentrierte Geschäftsmodelle, die Bezug und Einspeisung von Haushalten flexibilisieren. So können neben Prosumern, die sich bisher schon zur Anpassung ihres Verbrauchs an ihre Erzeugungsanlagen flexibilisieren, auch für reine Verbraucher:innen Anreize zur Flexibilisierung geschaffen werden z. B. durch flexible Preise oder Beteiligung an Lastmanagement.

Da bisherige Anwendungsfälle zur Flexibilisierung von stromgekoppelten dezentralen Energieanlagen in der Regel kombinierbar sind, bieten Beteiligte aus der Energiewirtschaft vermehrt sogenannte »Kombiprodukte« an. Üblicherweise beginnen diese beim Hauptanwendungsfall des Eigenverbrauchs eigener PV-Anlagen, der dann bspw. zusätzlich um eine FCR-Erbringung mit einem Batteriespeichersystem (BSS) erweitert wird, oder einer Orientierung an den variablen Strompreisen zur kostenreduzierten Deckung der verbleibenden Reststrommengen. Des Weiteren gibt es verstärkt die Tendenzen die Reststrombelieferung der Flexsumer bzw. die Bewirtschaftung der überschüssigen erneuerbaren Energieerzeugung der Prosumer direkt mit der zur Verfügungstellung eines oder mehrerer DEA-Produkte zu kombinieren. Beispiele hierfür sind sogenannte »Community«-Produkte als ein bilanzieller Zusammenschluss aus mehreren Pro- bzw. Flexsumern oder auch »Strom-Flatrates« für festgelegte Stromkontingente in Kombination mit (flexiblen) DEA.

Aus Digitalisierungssicht kommen an dieser Stelle in der Regel mehrere Systeme zum Einsatz. Vor Ort wird im Privatbereich üblicherweise ein Heimenenergiemanagementsystem (HEMS) eingesetzt, welches die stromgekoppelten DEA wie Wärmepumpen oder Energiespeichersysteme (ESS) sowie (Unter-)Zähler lokal ausliest bzw. ansteuert. Um zusätzlich bspw. FCR oder eine marktseitige Kopplung im Intradayhandel anzubieten, findet eine Aggregation auf höherer Ebene in Form von virtuellen Kraftwerken statt. Für diesen Zweck können u. a. Cloud-basierte Leitsysteme zum Einsatz kommen, die wiederum bspw. mit nachgelagerten Handels- und/oder Energiedatenmanagementsystemen IT-technisch verknüpft sind [21, 24, 90].

Gleichzeitig können sowohl auf der Basis der Messdaten von den (flexiblen) dezentralen Energieanlagen als auch den reinen Abnahmestellen, Kund:innen eine höhere Transparenz über ihre jeweiligen Energieflüsse geboten werden. Beispielsweise ermöglicht dies Mitgliedern von Energiegemeinschaften zielgerichtet mitzuteilen, inwieweit aktuell Überschüsse in der Gemeinschaft vorhanden bzw. zu erwarten sind, um den Eigenverbrauch zu erhöhen oder anzureizen. Passend dazu kann eine Information über den Reststrombezug aus dem übergeordneten Netz mitgegeben werden (wie Herkunft oder Energiemengen). Insofern gleichzeitig die verbundenen CO₂-Emissionen verfolgt werden, ist es im gleichen Zuge möglich die Emissionen über ein weiteres Zusatzprodukt auszugleichen, um den zunehmenden Nachfragetrend des kurzfristig umsetzbaren klimaneutralen Lebens bzw. eines kohlenstoffarmen Lebensstils zu adressieren.

Für diese Nutzungen kommen i. d. R. Backendsysteme zum Einsatz, die zentrale Funktionalitäten wie z. B. eine Messzeitreihenauswertung, anbieten. Für die Interaktion mit den Nutzer:innen sind anschließend Apps auf den persönlichen Endgeräten der Kund:innen oder auch ein Webinterface typische Wege zur Bereitstellung der Informationen bzw. zur Abwicklung der zusätzlichen Dienstleistungen [21].

Grundsätzlich ist beim potenziell relevanten Bereich der Energiegemeinschaften zu beachten, dass bereits seit Ende Juni 2021 eine Umsetzung von erneuerbaren Energiegemeinschaften zur weiträumigeren, gemeinschaftlichen Nutzung von (erneuerbarem) Strom sowie ggf. erneuerbarer Wärme aussteht (»energy sharing«). Im Detail fehlt die entsprechende Umsetzung in der deutschen Regulatorik der zugrundeliegenden EU-Rahmenrichtlinie »Renewable Energy Directive II«.

Entsprechend ist es bspw. auf Quartiersebene sehr kompliziert, ökonomisch tragbare Gemeinschaftsverbrauchsmodelle für die Bewohner:innen eines Quartiers zu entwickeln, wenn bspw. nicht alle Energieflüsse hinter einem Netzanschlusspunkt realisierbar sind [21].

Bei allen genannten Anwendungen sind zwei Punkte sehr zentral: Einerseits setzen Kund:innen mehrheitlich ein hohes Datenschutzniveau bei der Nutzung Ihrer Daten für eine Beteiligung voraus. Andererseits ist im Fall einer DEA-Flexibilisierung eine Beibehaltung des Komfortlevels sicherzustellen, ansonsten ist eine Ablehnung der beteiligten Kund:innen wahrscheinlich [4, 16, 17].

Nutzerzentrierte Energieangebote werden bisher oft von neuen Teilnehmenden am Energiemarkt vorangetrieben, die sich mithilfe von Digitalisierungskompetenzen einen Vorteil verschaffen können. Bestehende EVU müssen sich ebenfalls auf stärkere Nutzerzentrierung ausrichten, wenn sie konkurrenzfähig bleiben wollen. Laut [72] werden im Bereich der digitalen Kundenzentrierung noch nicht alle technischen Möglichkeiten ausgenutzt, obgleich bei den Unternehmen das Bewusstsein für die Notwendigkeit vorhanden ist und Initiativen und Projekte in Planung oder teilweise umgesetzt sind (z. B. Personalisiertes Targeting und Retargeting, »Near-real time« – reagierende Verkaufsstellen, Online-Zugänge zu Verbrauchs- und Abrechnungsdaten, automatisierte Interaktion mit Kunden:innen mittels Chatbots, Auswahl an Online-Zahlungsoptionen für Kunden:innen, Wechsel zu anderen Tarifpaketen vollständig online durch die Kunden:innen, Bündeln von anderen Produkten zu bestehendem Vertrag per Online-Formular.

4.3 Anlagenkommunikation

Ein Energiesystem, in dem Energiewandlungsanlagen zunehmend dezentral installiert und betrieben werden, ist auf eine leistungsfähige Anlagenkommunikation zur Überwachung und Steuerung angewiesen. In der Vergangenheit wurde der Stromsektor von wenigen Großkraftwerken dominiert, die überwiegend vor Ort überwacht und gesteuert wurden. Im Zuge der Energiewende wird eine große Anzahl kleinerer Stromerzeugungsanlagen installiert, die bereits jetzt größtenteils über Intermediäre wie Aggregatoren dynamisch vermarktet werden. Ähnliches gilt zukünftig verstärkt für steuerbare Verbrauchseinrichtungen, die eine größere Sensitivität auf die Verfügbarkeit von günstigem oder CO₂-armem Strom aufweisen werden.

»Die Anlagenkommunikation zur Bewältigung der zunehmenden Dezentralität des Energiesystems ist in einigen Bereichen bereits umgesetzt, muss aber konsequent ausgeweitet und weiterentwickelt werden.«

Intelligentes Messsystem

Mit dem Inkrafttreten des Gesetzes zur Digitalisierung der Energiewende [91] wurde der Grundstein für die Einführung und den Rollout intelligenter Messsysteme (Smart Meter für Erzeuger:innen und Verbraucher:innen auf Messlokationsebene - alle Messstellen an Zählpunkten) gelegt. Dies wird als ein wesentlicher Baustein für die Digitalisierung der Energieversorgung angesehen und soll die verbauten und am weitesten verbreiteten analogen Ferraris-Stromzähler ablösen.

Dabei werden Messsysteme als intelligent bezeichnet (Smart Meter), wenn diese Daten digital erfassen, speichern, senden und empfangen können. Hierbei bezieht sich in diesem Zusammenhang der Ausdruck Intelligenz auf die Kommunikationsfähigkeit des Systems zum Senden und Empfangen von Daten. Die im Vergleich zum Ferraris-Zähler digitale Messeinrichtung wird als moderne Messeinrichtung (mME) bezeichnet. Zu einem intelligenten Messsystem gehören im Wesentlichen zwei Bestandteile, ein digitaler Stromzähler, die moderne Messeinrichtung (mME), und die Kommunikationseinheit das sogenannte Smart Meter Gateway (SMGW). In der Vorbereitung des Roll-

Outs intelligenter Messsysteme stand das SMGW als Sicherheits- und Vertrauensanker des intelligenten Messsystems im besonderen Fokus [92].

Stand August 2022 sind durch das BSI SMGWs von vier Herstellern für die Nutzung zertifiziert [93]. Als SMGW-Administrator sind nach BSI derzeit 46 Unternehmen zertifiziert, wobei hier eine gewisse Dynamik zu erwarten ist, da eine Zertifizierung mit einer Gültigkeit begrenzt ist [94]. Für die Zertifizierung von SMGW sind nach Vorgaben des BSI Mindestanforderungen für den Betrieb eines SMGW erstellt worden. Dabei sind die Systemarchitektur, sicherheitstechnische Anforderungen, die technische Richtlinie TR-03109- 1 bis 6, die Sicherstellung der Interoperabilität des intelligenten Messsystems und der Anwendung von Smart-Metering-PKI (SM-PKI) definiert [95].

Aus den regulatorischen Marktvorgaben hinsichtlich der Geschäfts- und Marktprozesse ergeben sich durch den Rollout von intelligenten Messgeräten bislang folgende grundlegende Neuerungen, welche in den einzelnen Prozessdokumenten der Bundesnetzagentur [96] und [97] im Detail beschrieben sind.

Das Gesetz zur Digitalisierung der Energiewende setzt ebenfalls die Rahmenbedingungen für den verpflichtenden bzw. optionalen Rollout von intelligenten Messsystemen. Dabei ist der Messstellenbetreiber für die Umsetzung der gesetzlichen Vorgaben verantwortlich. Nach dem Gesetz gilt eine Pflicht bzw. Option zum Einbau von intelligenten Messsystemen durch den Messstellenbetreiber bedarfsgerecht für die folgenden Verbraucher- und Anlagengruppen:

- 1) Verpflichtend für Verbraucher:innen von über 6.000 Kilowattstunden pro Jahr, optional für Verbraucher:innen < 6.000 Kilowattstunden bzw. bis 2032 mind. Ausstattung mit mME.
- 2) Verpflichtend für alle Erzeugungsanlagen mit einer Nennleistung von mehr als 7 Kilowatt, optional für Erzeugungsanlagen zwischen 1 Kilowatt bis 7 Kilowatt.
- 3) Verpflichtend für Anlagen mit steuerbaren Verbrauchseinrichtung, z. B. einer Wärmepumpe oder einer Nachtspeicherheizung.

Abgesehen von den vorgesehenen Funktionalitäten im Bereich des Messwesens stellt das intelligente Messsystem die Möglichkeit zur Umsetzung von sogenannten Mehrwertdiensten zur Verfügung. Diese Mehrwertdienste können von Marktakteuren den Endkund:innen angeboten werden. Die Dienste nutzen den CLS-Kanal des Smart Meter Gateways bspw. zur Überwachung und Steuerung der über eine Steuerbox angebotenen Anlagen, bspw. Ladepunkte, Wärmepumpen oder andere leistungsintensive Verbraucher [98].

Der Smart Meter Rollout wurde in der Vergangenheit oftmals kontrovers diskutiert [99]. Am 14.09.2022 hat Staatssekretär Dr. Patrick Graichen während des 20-jährigen Jubiläum des Bundesverband neue Energiewirtschaft (bne) konstatiert, dass in den vergangenen zehn Jahren bei Smart Metern »praktisch nichts geschafft« wurde [100]. Er kündigte daher ein Neustart dazu an.

Anlagenkommunikation in der Direktvermarktung

Die verpflichtende Fernsteuerbarkeit und Fernauslesbarkeit von Anlagen ist seit längerem gesetzlich für die Direktvermarktung im Strombereich im EEG geregelt (aktuell EEG 2021 §10b). Die Forderung hat dazu geführt, dass neue Anlagen in Deutschland, die für eine Direktvermarktung vorgesehen sind, mit einer Kommunikationsschnittstelle ausgestattet sind. Findet eine Vermarktung über die Regelreservemärkte statt, sind weitere Anforderungen zur Kommunikationsgeschwindigkeit, Latenzen sowie Übertragungswege zu berücksichtigen¹.

¹ Mindestanforderungen an die Informationstechnik des Reservenbieters zur Erbringung von Regelreserve Stand: 01.03.2022

In der Praxis sind existierende Industrie- oder Energiekommunikationsprotokolle wie Modbus-TCP, IEC 60870-5-104 oder auch OPC XML DA im Einsatz, die teilweise schon relativ lange verwendet und nicht weiterentwickelt werden. Einige Hersteller von Anlagen nutzen auch proprietäre Lösungen auf Basis von Webservices oder anderen Technologiestacks. Protokolle, die seit Jahren als Smart Grid Protokolle beschreiben werden, wie z. B. IEC 61850 oder auch Industrie 4.0 Protokolle wie OPC UA findet sich aktuell selten bis gar nicht in der praktischen Umsetzung. Hier ist eine große Divergenz zwischen der Forschungslandschaft und aktuellen Veröffentlichungen zu Kommunikationsprotokollen und dem praktischen Einsatz dieser wahrzunehmen.

Anlagenkommunikation im Netzbetrieb

Neben der Anlagenvermarktung sind Betreiber dezentraler Erzeugungsanlagen ebenfalls verpflichtet, in Abhängigkeit der Anlagenleistung, Kommunikationskanäle zum Anschlussnetzbetreiber zu unterhalten.

Nach der Anmeldung der Anlage mit ihren entsprechenden Stammdaten (wie z. B. Anlagenleistung, Anlagentyp und Standort) werden über diese Schnittstelle Bewegungsdaten in regelmäßigen Abständen zur Netzüberwachung an den Anschlussnetzbetreiber übermittelt. Dabei kann es sich bspw. um aktuelle Leistungsdaten handeln. Ebenso können Netzbetreiber über diese Datenkanäle steuernd auf Anlagen einwirken. Ein Beispiel hierfür ist die Abregelung von Stromerzeugungsanlagen im Rahmen des Einspeisemanagements.

In der Vergangenheit wurde hierfür häufig Rundsteuertechnik eingesetzt (insbesondere zur Steuerung von Nachtspeicherheizungen), die jedoch keine granulare Steuerung einzelner Anlagen ermöglicht. Diese Variante der unidirektionalen Anlagenkommunikation wird jedoch zunehmend ersetzt [101]. Die technische Ausgestaltung dieser Anlagenkommunikation im Prozessnetz des Anschlussnetzbetreibers ist im Detail in den jeweiligen technischen Anschlussbedingungen (TAB) beschrieben und basiert häufig auf industriellen Kommunikationsprotokollen wie IEC 60870-5-104 oder IEC 61850. Prinzipiell ist die Nutzung der Smart Meter Gateway Infrastruktur auch für diese Anwendungsfälle denkbar, wie sie auch im Stufenmodell zur Weiterentwicklung des intelligenten Messsystems vorgesehen sind [98].

Für Stromerzeugungsanlagen ab 100 Kilowatt installierter Leistung und Speicher ist seit 2022 die Branchenlösung »Redispatch 2.0« umgesetzt. In diesem Kontext wurde eine zusätzliche Infrastruktur für den Austausch von Stamm- und Bewegungsdaten zwischen Anlagenbetreibern und unterschiedlichen Netzbetreibern in allen Netzebenen etabliert. Der Datenaustausch erfolgt über die bereits eingeführte, zentrale Datenplattform »Connect+«, an die alle betroffenen Anlagenbetreiber und Netzbetreiber direkt oder indirekt angebunden sind [102]. Mithilfe der ausgetauschten Plan- und Prognosedaten wird der Netzbetrieb unter Einbezug der teilnehmenden Anlagen optimiert. Die Anbindung zur Datenplattform erfolgt über SFTP oder Webservice [103].

4.4 Netzbetrieb und -planung

Digitalisierung von Netzen, Anlagen und Geräten

Die Digitalisierung der Stromnetze in Deutschland hat seit Beginn der Energiewende, insbesondere durch die Integration dezentraler, erneuerbarer Energieanlagen in den verschiedenen Netzebenen, deutlich an Fahrt aufgenommen und wurde insbesondere in den Höchst- aber auch Hochspannungsnetzen umgesetzt. Hier bestand bisher die größte Notwendigkeit, Informationen zwischen Netzbetreibern auszutauschen, um einen stabilen Netzbetrieb zu gewährleisten. Die systemische Relevanz der unteren Spannungsebenen war weitaus geringer, die Kosten für eine abgesicherte und stabile Digitalisierung der Betriebsmittel war nicht gerechtfertigt. Mit zunehmender dezentraler Erzeugung in den Verteilnetzebenen und den zusätzlichen elektrischen Lasten aus

Verkehrs- und Wärmesektor ändert sich das. »Generation and load data provision methodology« (GLDPM)- und Redispatch 2.0 sind gute Beispiele für neue Prozesse, die ohne durchgängige Digitalisierung nicht umsetzbar sind. So ist es im Redispatch 2.0-Prozess z. B. notwendig, auf Grundlage von digitalen Netzmodellen, Erzeugungs- und Lastflexibilität zu bestimmen und für einen Prognose-Zeitraum von mind. 36 Stunden mit der jeweiligen Wirksamkeit auf Netzverknüpfungspunkte zum Höchstspannungsnetz zu kommunizieren. Dieser Prozess umfasst aktuell Erzeugungsanlagen mit einer installierten Leistung von mindestens 100 Kilowatt (sowie kleinere Anlagen mit Ansteuerungsmöglichkeiten). Diese Anlagen stehen überwiegend in den Mittelspannungsnetzen. In einem zukünftigen Redispatch 3.0-Prozess sollen dann auch Kleinstflexibilität aus Niederspannungsnetzen und kleineren Erzeugungsanlagen mit in den Prozess aufgenommen werden [104].

»Die Digitalisierung ist in den Übertragungsnetzen schon fortgeschritten und muss nun auch in die Verteilnetze ausgeweitet werden.«

Die Notwendigkeit und die Dringlichkeit eines Netzausbaus kann reduziert werden, wenn Netze näher an den Auslegungsgrenzen betrieben werden. Eine Überwachung und kleinteiligere Steuerungsoptionen sind dann notwendig, um besonders hohe Netzbelastung aktiv zu vermeiden - das heißt Energieflüsse zu steuern. Derzeit sind die Verteilnetze in aller Regel noch nicht an den Belastungsgrenzen, eine flächendeckende Zustandsüberwachung ist noch nicht zwingend, und daher aus wirtschaftlichen Erwägungen bisher nur in sehr ausgewählten Netzen, implementiert. Darüber hinaus ist die Netzverstärkung gegenüber einer Betriebsoptimierung durch die aktuelle Anreizregulierung bessergestellt.

Im Bereich der Netzleittechnik sind vielen Kommunikationsprotokoll-Standards im Einsatz. Viele Komponenten des Stromnetzes sind bereits viele Jahrzehnte in Betrieb und verrichten ihre Aufgaben im Prinzip nach wie vor zuverlässig. Die Kommunikationstechnik ist allerdings entsprechend alt. So ist die Systemtechnik über die Jahre gewachsen und nur bei einer Notwendigkeit an neue Anforderung angepasst worden. Bei dem Umbau zu einer durchgehenden, interoperablen Netzleittechnik muss diese daher mit neuen und alten Technologien gleichermaßen funktionieren, auch wenn es zum Teil massive Defizite bei Funktionalität und Cybersicherheit gibt. Bei schaltbaren Lasten in der Niederspannung wird nach wie vor sehr häufig auf einfache unidirektionale Kommunikationstechnik wie Rundsteuertechnik gesetzt, und auf feste Zeitschaltuhren, um Anlagenverhalten zu regeln bzw. vorab festzulegen (bspw. im Rahmen vom §14a EnWG) [105].

Hochrechnungen und Prognosen der Einspeisung von Strom aus Wind- und Photovoltaikanlagen sind wichtig für die kosteneffiziente Integration von volatiler Erzeugung in das Stromnetz und die Sicherstellung der Netzstabilität. Übertragungs- und Verteilnetzbetreiber benötigen sie für die operative Netzführung. Außerdem sind sie für die kosteneffiziente Intraday-Vermarktung der EEG-geförderten Einspeisungen notwendig, die aktuell bis zu fünf Minuten vor Lieferung möglich ist. Die Hochrechnungen bieten die Grundlage für die Bestimmung der aktuellen Netzlast, die wiederum ein zentraler Parameter bei der Überwachung der Netzstabilität ist. Da Messwerte der tatsächlich eingespeisten Leistung nur für einen kleinen Teil aller Anlagen in Nahe-Echtzeit zur Verfügung stehen, werden Hochrechnungsverfahren benötigt, um die aktuelle Einspeisung zu bestimmen. Hochrechnungen werden heute vor allem auf Basis von verfügbaren Echtzeit-Messwerten der Einspeisung von Wind- und PV-Referenzsystemen erstellt.

Eine zunehmende Herausforderung stellt die stetige Zunahme von PV-Eigenverbrauch dar, kombiniert mit Batteriespeichern, Elektrofahrzeugen und flexiblen Verbrauchern, die zunächst für die lokale Eigenverbrauchsmaximierung genutzt werden. Dies wird zu grundlegenden Veränderungen

von PV-Einspeise-Profilen führen. Während bisher die PV-Einspeisung wesentlich durch das Wetter bestimmt war, wird nun das Zusammenspiel der Erzeugung mit unterschiedlichen Verbrauchstypen und Steuerungsstrategien auf Einzelsystemebene zunehmend wichtig.

4.5 Cybersecurity im Energiesystem

Die fortschreitende Digitalisierung des Energiesystems hat dem Schutz der Energieversorgungsinfrastrukturen vor Cyberangriffen in den letzten Jahren zunehmend mehr Bedeutung verliehen. Auf Grund der zentralen Rolle der Energieversorgung als kritische Infrastruktur, ergeben sich aus einer wachsenden Bedrohungslage durch Cyberangriffe massive Herausforderungen hinsichtlich der Gewährleistung der permanenten Versorgungssicherheit.

Verstärkt werden diese Herausforderungen durch die Eigenschaft des Energiesystems als komplexe, gekoppelte und räumlich verteilte Infrastruktur, deren Betriebsführung sich über verschiedene physikalische und informationstechnische Ebenen erstreckt. Diese IT-Ebenen, die zumeist in »Unternehmens-IT« und »Prozess-nahe OT« (Operational IT - Operative Technologien, Systeme zur Steuerung von Industrieanlagen) unterteilt werden, zeichnen sich in Bezug auf den Stand der Technik durch die Beschreibung von Cyber-Bedrohungen, die Überwachung und das Monitorings von sicherheitsrelevanten Informationen, sowie der Absicherung der jeweiligen Komponenten und Kommunikationstrecken durch eine große Divergenz, aus. Dies erschwert die Umsetzung durchgängiger Risikobewertungen und einheitlicher IT-Sicherheitsmaßnahmen erheblich.

Für Energieversorgungsunternehmen stellen neben der veränderten Bedrohungslage durch Cyberangriffe aber auch die kontinuierlich weiterentwickelten rechtlichen Rahmenbedingungen im Bereich Cybersicherheit Herausforderungen dar.

Veränderte Bedrohungslage durch Cyberangriffe

Die Digitalisierung der Energieversorgung, stark getrieben durch die Dezentralisierung und Liberalisierung und den damit einhergehenden neuen Marktpartnern und Marktprozessen, führte zu einem massiven Anstieg der Anzahl und Komplexität der Informations- und Kommunikationssysteme, die zur Sicherstellung der Funktionsfähigkeit der Energieversorgung notwendig sind. Die Angriffsfläche für Cyberbedrohungen, die durch diese digitale Vernetzung stetig steigt, wird zusätzlich durch neue dezentrale Technologien und Trends, wie z. B. Industrial Internet of Things (IIOT) oder Smart City und Smart Home massiv erhöht. Im selben Zuge wächst die Abhängigkeit der Energieversorgung von einer jederzeit funktionierenden Informations- und Kommunikationsinfrastruktur an. Gleichzeitig nehmen Cyberangriffe auf alle Bereiche der Wirtschaft, Verwaltung und der öffentlichen Infrastrukturen weltweit zu, in den letzten Jahren teilweise dramatisch [106].

Die Motivationen für Cyberangriffe sind unterschiedlich, genau wie deren Komplexität und Möglichkeit der Nachahmung, z. B. durch bekannte Sicherheitslücken und entsprechende verfügbare Werkzeuge oder die Verfügbarkeit als Dienstleistungen, wie z. B. »Ransomware-as-a-Service« (RaaS). Dabei spielt die Cyberkriminalität als Triebkraft quantitativ gesehen die größte Rolle. Bei den hierzu genutzten Angriffsmethoden haben in den letzten Jahren vor allem Ransomware-Angriffe, also sogenannte Erpressungstrojaner drastisch zugenommen [106]. Direkte Angriffe auf die Prozessinfrastruktur finden durch diese Angriffe in der Regel nicht statt oder sind zumindest nicht das direkte Angriffsziel. Die Auswirkungen der Verschlüsselung der IT-Infrastruktur, wie Datei- oder E-Mailserver auf die Abwicklung der Marktprozesse sind allerdings gewaltig und können indirekt auch den Versorgungsprozess sabotieren. Zudem kommt es auf Grund der Abhängigkeiten von Unternehmen zu sogenannten Supply Chain Attacks (Lieferkettenangriffe), bei denen auch abhängige Unternehmen direkt oder indirekt Ziel eines solchen Angriffs werden kann. Zusätzlich ergibt sich für Unternehmen der Energieversorgung aus dieser Art der Angriffe die Gefahr der

Veröffentlichung von Unternehmens- oder Kundendaten. Neben dem wirtschaftlichen Schaden ist es hier vor allem der Vertrauensverlust, der zu einem dauerhaften Marktnachteil führen kann.

Im Bereich prozessnahen Informationstechnik (OT) ist die Situation etwas differenzierter. Hier sind es vor allem komplexe, mehrstufige Angriffe, die auf die OT-Infrastruktur und damit direkte auf Beeinflussung des Versorgungsprozesses abzielen. Im Gegensatz zur Unternehmens-IT sind dies Angriffe zumeist Zero-Day-Angriffe, also Angriffe, die unbekannte Schwachstellen des Produktes ausnutzen. Sogenannte »Advanced Persistent Threads« (ATP) stellen eine besondere Bedrohung für Unternehmen dar, gelingt es hier den Angreifer:innen sich über einen sehr langen Zeitraum unbemerkt in der IT-Infrastruktur des Opfers aufzuhalten und Informationen zu sammeln. Der Angriff auf die ukrainische Stromversorgung im Jahr 2015 [107] stellt eine solche komplexe Vorgehensweise dar und ist ein Beispiel dafür, welcher Aufwand in der Vorbereitung und Durchführung derartiger komplexer Cyber-Attacken notwendig ist. Daraus ist zu schlussfolgern, dass solche Angriffe hauptsächlich durch staatliche Akteure finanziert sein müssen und demnach politisch oder terroristisch motiviert sind. Die Entwicklung der verwendeten Schadsoftware (Malware) geht dabei weiter in Richtung der speziellen Gegebenheiten der OT-Infrastruktur und damit auch der Fernwirktechnik. Cyber-Frameworks wie z. B. Pipedream [108] stellen mittlerweile eine neue Qualität in der Bedrohung von OT-Infrastrukturen dar.

Eine weitere Cyber-Bedrohung für die Energieversorgung ergibt sich durch die zunehmende Nutzung öffentlicher Kommunikationsinfrastrukturen. Zwar erfolgt die Datenübertragung in der Regel abgesichert über VPN und verschlüsselt. Bei Sabotage der Kommunikationswege oder –infrastruktur kommt es trotzdem zur Störung der Datenübertragung. Ein aktuelles Beispiel hierfür liefert der Angriff auf die Kommunikationsinfrastruktur des Satelliteninternet-Netzwerkes KA-Sat. Als eine Auswirkung, die nicht das unmittelbare Ziel des Angriffs darstellte, wurden die Modems von mindestens 3000 Windkraftanlagen einer Malware infiziert und somit der Fernzugriff auf die Steuerung der Anlagen unterbrochen.

Rechtliche Rahmenbedingungen der Cybersicherheit

Der Zunahme der Cyber-Bedrohung gegenüber stehen staatliche Maßnahmen zur Prävention von Cyberangriffen. Die rechtlichen Rahmenbedingungen, welche sich durch verschiedene gesetzliche Grundlagen ergeben, stellen für viele Unternehmen aber ebenfalls eine Herausforderung dar. Zum einen hinsichtlich der Schaffung der technischen Voraussetzungen aber auch in Bezug auf die Verfügbarkeit und Finanzierung von qualifiziertem Personal. Die rechtlichen Bestimmungen für Unternehmen aus der Energiebranche bestehen aus der Verknüpfung verschiedener Gesetze und Vorschriften auf unterschiedlichen EU- und nationalen Ebenen.

Durch das BDEW Whitepaper, welches in Version 1.0 im Jahr 2011 erschien und in aktueller Version aus dem Jahr 2018 stammt [109], wurde die Entwicklung des rechtlichen Rahmens aktiv unterstützt.

Im Jahr 2015 ist das »Gesetz zur Erhöhung der Sicherheit informationstechnischer Systeme« (IT-Sicherheitsgesetz) [110] als Teil der »Digitalen Agenda« der Bundesregierung in Kraft getreten. Neben dem bereits deutlich im Namen erkennbaren Ziel, geht es im Wesentlichen um die Prävention von Ausfällen mit dramatischen Folgen für Wirtschaft, Staat und Gesellschaft.

Durch das »Gesetz über das Bundesamt für Sicherheit in der Informationstechnik« (BSI-Gesetz) [111] wird dem BSI die Rolle der zentralen Meldestelle für die IT-Sicherheit Kritischer Infrastrukturen zugeordnet, sowie die Nachweispflicht für Betreiber kritischer Infrastrukturen in Bezug auf Einhaltung der IT-Sicherheit geregelt. Die sogenannte BSI-Kritis-Verordnung [112] definiert dann die KRITIS-Sektoren und KRITIS-Schwellwerte für Anlagen.

Auf europäischer Ebene trat im Jahr 2016 die »Richtlinie zur Gewährleistung einer hohen Netzwerk- und Informationssicherheit« (NIS-Richtlinie) in Kraft [8]. Diese Richtlinie wurde 2019 mit dem EU Cybersecurity Act [9] aktualisiert.

Die IT-Sicherheitskataloge nach EnWG legen die IT-Anforderungen für Netzbetreiber (Strom und Gas) und Betreiber von Energieanlagen fest und beinhaltet die verpflichtende Einführung eines Managementsystems für die Informationssicherheit (ISMS) gemäß ISO/IEC 27001.

Als zunächst letzte Iteration des rechtlichen Rahmens trat im Mai 2021 das IT-Sicherheitsgesetz 2.0 (IT-SiG 2.0) [113] in Kraft. Hierin werden unter anderem die Instrumente des BSI erweitert, die Unternehmen verpflichtet ab 2023 Systeme und Prozesse zur Angriffserkennung einzusetzen und die Vertrauenswürdigkeit entlang der Lieferkette für IT-Produkte geregelt. Auf europäischer Ebene ist der EU Cybersecurity Act seit 2021 in Kraft.

»Die zunehmende Digitalisierung und fortgeschrittene Cyberangriffe machen das Energiesystem verwundbar, während die Sicherheitsmaßen oft noch unzureichend sind.«

5 Digitalisierung des Energiesystems – 14 Thesen zum Erfolg

Auf der Grundlage des zuvor beschriebenen Stands der Digitalisierung der Energiewende sowie einer literaturbasierten Gap-Analyse hinsichtlich des Potenzials von Digitalisierungsansätzen, haben die Fraunhofer-Expert:innen eine Reihe von Thesen aufgestellt, aus denen sich konkrete Handlungsempfehlungen für den effizienten und nachhaltigen Einsatz von digitalen Werkzeugen bei der Dekarbonisierung des Energiesystems ergeben.

Im Rahmen von Expert:innen-Workshops bzw. -Interviews wurde externe Fachexpertise aus Industrie und Forschung hinzugezogen. In diesem Prozess wurden die erhobenen Thesen diskutiert, geschärft und validiert. Endergebnis dieses Vorgehens sind die folgenden 14 Thesen, die aus Sicht der Fraunhofer-Energieforschung essenziell für die Umsetzung der Energiewende sind. Wie bereits eingangs erwähnt besteht kein Anspruch auf Vollständigkeit – die Thesen und die daraus abgeleiteten Handlungsempfehlungen wurden von den Expert:innen aufgrund von Ihrer Relevanz sowie der Option auf eine Umsetzbarkeit in den nächsten fünf Jahren ausgewählt.

Die Thesen bauen auf den Analysen der vorherigen Kapitel auf und formulieren erfolgskritische Empfehlungen, strukturiert nach den thematischen Schwerpunkten - Datenökonomie, Sektorenkopplung, Anlagenkommunikation, Netzbetrieb und -planung, sowie Cybersicherheit. Abschließend wird die europäische Dimension bei der Digitalisierung des Energiesystems hervorgehoben – da die digitale Energiewende in Deutschland in eine europäische Strategie und ein europäisches System aus Regularien eingebettet ist und nicht ausschließlich national geplant und umgesetzt werden sollte.

5.1 Schwerpunkt Datenökonomie

Moderne KI-Verfahren zur Identifikation und Hebung von Effizienzpotenzialen, als auch zur Bewältigung komplexer Interaktionen zwischen einer Vielzahl an Akteur:innen erfordern neue Formen des akteursübergreifenden Teilens von Informationen. In Zukunft ist eine erhebliche Beschleunigung des Umbaus der Energieversorgung notwendig, die mit bestehenden Prozessen nur schwer zu realisieren ist. Ein Ansatz zur Bewältigung dieser Herausforderung ist es, eine offen zugängliche und vertrauenswürdige Datenökonomie zu schaffen, die trotz neuer weltpolitischer Rahmenbedingungen eine souveräne Energieversorgung mithilfe resilienter IKT-Infrastrukturen ermöglicht.

These 1: Der Wert von Energie ist zukünftig abhängig von den verknüpften Daten

Kurzerläuterung

Sowohl mit der Zunahme an Stunden mit hohen Anteilen erneuerbarer Energie von Wind- und PV-Anlagen, als auch der allgemeinen, vermutlich länger anhaltenden Erhöhung des Preisniveaus auf dem Strommarkt, nimmt die Bedeutung von Preisspreads signifikant zu. Hintergrund ist insbesondere die fast grenzkostenfreie Erzeugung aus Wind- und Solarenergie, die mit ihrer natürlichen Fluktuation das Marktgeschehen beeinflusst. Als Resultat hängt der Wert der Energie im Wesentlichen von vielen zeitabhängigen Faktoren und somit von den dahinterliegenden Daten ab. Folglich rückt mehr in den Fokus, wann Energie genutzt wird, als der ausschließliche Verbrauch von primär grenzkostenfreiem erneuerbarem Strom bzw. darauf basierender Energieflüsse [114, 115].

Zusätzlich zu den genannten Faktoren sind Unsicherheiten von besonderer Relevanz für den Wert der Energie. Je höher die Unsicherheit (insbesondere am Strommarkt) ist, desto höher sind die Ausgleichskosten des Leistungsungleichgewichts. Als ein historisches Beispiel einer solchen Situation sei die Sonnenfinsternis am 20.03.2015 genannt. Aufgrund der erhöhten Unsicherheit bzgl. der Auswirkungen auf die PV-Erzeugung fand eine erhöhte und damit sehr kostenbehaftete Bereitstellung von Regelreserve statt. Je mehr hilfreiche Daten bspw. aus der Meteorologie oder PV-Erzeugungsdaten vorliegen, desto besser kann hier agiert werden, wie neuste Prognoseverfahrensentwicklungen zeigen. Darüber hinaus unterstützten größere und qualitativ hochwertige Datensätze Prognose im Allgemeinen, um bspw. die Vermarktung von fluktuierenden erneuerbaren Energien zu verbessern [116–119].

Neben dem Stromsektor gilt der Leitsatz der These genauso für andere Sektoren wie bspw. bei der Nachweisverfolgung von Wasserstoff (grün, grau, blau, etc): Ein konkretes Produktbeispiel ist CO₂ armer Stahl [120]. In diesem Kontext muss zur Werterhaltung des Endprodukts zweifelsfrei nachgewiesen werden, dass der eingesetzte Wasserstoff vollständig auf Basis von erneuerbarem Strom erzeugt worden ist [121].

Bedeutung für Schlüsselakteure der Energiewirtschaft

Betreiber von dezentralen Energieanlagen (DEA)

Für die Betreiber dezentraler Energieanlagen nimmt sowohl die Bedeutung von Sensor- und Datenqualität als auch die Datenverfügbarkeit zu, die gleichzeitig möglichst kostenarm umzusetzen ist. Wenn diese Rahmenbedingungen nicht gegeben sind, ergeben sich potenziell wirtschaftliche Nachteile bzw. Mindereinnahmen über den gesamten Lebenszyklus einer Anlage. Diesbezüglich ist vor allem die Betriebsphase von höchster Relevanz [122–125].

Energiehändler und Netzbetreiber

Wie bereits anhand des Prognosebeispiels dargelegt wurde, nimmt die Bedeutung einer umfassenden Datengrundlage sowohl im Stromhandel als auch bei der Planung von zugehörigen marktlichen Systemdienstleistungen wie der Regelreserve zu. Zusätzlich bewirkt die Vernetzung mit dem Stromsektor bspw. mit der E-Mobilität oder dem Wasserstoffsektor neue Herausforderungen in der Beherrschung dieser Abhängigkeiten zueinander, die ausschließlich mit erweiterten und neuen, einfacheren Datenaustauschen sowie der Analyse der enthaltenen Informationen gelingen kann. Weitere Details folgen in diesem Zusammenhang in den Thesen 4 und 6 im Schwerpunkt Sektorenkopplung [21, 126].

Letztverbraucher:innen und Netzbetreiber

Eine Vielzahl an neuen Akteur:innen, vor allem Pro- und Flexsumer werden stärker mit ihren Daten in das Energiesystem integriert, wenn sie bspw. im Rahmen vom Redispatch 3.0² neue Relevanz für den Verteilnetzbetrieb mit (flexiblen) DEA gewinnen. Einerseits nimmt der Wert der zugehörigen Daten zu, andererseits sind diese dafür unter Umständen ausschließlich mit (sehr) hohem Datenschutzniveau verarbeitbar. Letzteres erfordert vor allem datensouveräne Lösungen wie bspw. Datenraum-Ansätze wie auch die Anwendung von sicheren Optionen zum Aufheben des Personenbezugs, z. B. Machine-Learning-Verfahren (ML-Verfahren) auf der Basis großer Datensätze [127–129].

Zentrale Botschaften an politische Akteur:innen

Grundsätzlich muss die regulatorische Seite verschiedene Impulse setzen, damit es am Ende zu einem sehr aktiven Datenaustausch zwischen den verschiedenen Akteur:innen kommt. Insbesondere die folgenden Punkte sind an dieser Stelle anzugehen [130–133]:

- 1) Offene Fragen des Datenbesitzes (»data ownership«) bei DEA-Daten sind zu klären, damit eine rechtssichere Grundlage für den Datenhandel herrscht.
- 2) Darauf aufbauend sollte rechtlich abgesichert sein, dass speziell DEA-Betreiber auf gewisse Datensätze ihrer Anlagen prinzipiell zugreifen können. Hierbei sind vor allem die relevanten Anwendungen im Bereich der Anlagenflexibilisierung zu ermöglichen.
- 3) Für diese Datensätze wie auch generell sollte bei jedem Datenaustausch das FAIR-Prinzip (»Findability, Accessibility, Interoperability and Reusability«) möglichst vorgeschrieben sein, sodass die Kosten eines Datentransfers in der Skalierung möglichst gering sind. Dies gilt insbesondere bei »public data« und »open data«.
- 4) Da ein Datenraum zudem an Attraktivität gewinnt, wenn auf der einen Seite viele sinnvolle Daten zur Verfügung stehen und auf der anderen Seite diese Daten möglichst kostenarm sind, sollte mit dem Prinzip »Public Money – Public Data« eine kostenfreie Grundbasis an Daten zur

² Redispatch 3.0 umfasst die Einbindung von dezentralen Energieanlagen in der Niederspannung, die bisher nicht über den Redispatch 2.0 erfasst werden (i.d.R. Erzeugungsanlagen ab 100 kW installierte Leistung).

Verfügung stehen, die für vielfältige kommerzielle wie auch wissenschaftliche Zwecke genutzt werden kann.

Zentrale Handlungsempfehlungen

Die bisherige Prozesslandschaft ist geprägt von vielen bilateralen wie auch einzelnen zentralen Plattformen wie bspw. »connect+« im Redispatch 2.0 Kontext. In diesem Bereich sind proprietäre als auch (teil-)standardisierte Lösungen im Einsatz, die jedoch in Summe nicht den Anforderungen eines Energiedatenraums im Sinne der europäischen Richtungsentscheidung zur Gründung eines Europäischen Energy Data Space (EDS) entsprechen.

Nichtsdestotrotz ist ein EDS kein Selbstzweck, sondern in die bisherige IKT-Landschaft einzubinden und besonders dort einzusetzen, wo eine hohe Anzahl an Akteur:innen zusammentrifft und die Datensouveränität eine Kernanforderung ist. Hier ergeben sich im Bereich der Energieversorgung mit ihren neu bzw. verstärkt zu verknüpfenden Sektoren (Mobilität, Wohnungswirtschaft, IKT, etc.) neue Optionen zur Schaffung einer Datenökonomie.

Für den Aufbau eines EDS sind vor allem die Governance, Standardisierungs- und zugehörige Zertifizierungsaktivitäten initial zu fördern, wie die fortgeschrittenen Datenrauminitiativen »Catena-X«, zur Organisation der automobilen Wertschöpfungskette, als auch der »Mobility Data Space« (ehemals »Datenraum Mobilität«) für den Austausch von mobilitätsbezogenen Daten (Wetter-, Infrastrukturdaten, etc.) zeigen [78, 134, 135].

These 2: Digital getriebene Wertschöpfungsnetzwerke sind die Zukunft des Energiesystems

Kurzerläuterung

Digitalisierung dient nicht nur der (anteiligen) Automatisierung bestehender Prozesse, sondern bietet auch die Möglichkeit zur Neugestaltung der bisherigen Prozesslandschaft zur Anpassung an die »neue Energiewelt« [136]. Konkrete Beispiele dieser voranschreitenden Entwicklung lauten wie folgt:

- Eine Erhöhung des Grades der Automatisierung in allen Bereichen der Netzbetriebsführung ist zu erwarten. Im Detail sieht der Verband der Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik e.V. (VDE) i. d. R. Systeme vor, die in einem begrenzten Einsatzszenario vollständig autonom reagieren ohne notwendige menschliche Interaktion, welche als »Autonomiestufe 3 – Bedingungsautomatisierung« – bezeichnet wird [137]. Exemplarisch sei die bedingte automatisierte Regelung von Inselnetzen im Verteilnetz im Schwarzfall genannt. Diese erlaubt einzelne Netzbereiche unabhängig vom übergeordneten Netz zu betreiben und ist im Allgemeinen als »Microgrid«-Funktionalität bekannt [137].
- Digital getriebene Aggregatoren stellen das klassische Commodity-Geschäftsmodell von bisherigen Energieversorgern in Frage. Kernelement dieser Entwicklung sind die Optionen dezentraler Energiesysteme, die von den Aggregatoren gebündelt werden. Vor allem »original equipment manufacturers« von DEA liefern mittlerweile zusätzlich zur reinen Hardware passende IKT-basierte Energiedienstleistungen [138–140].

- Aufgrund des zunehmenden Fachkräftemangels setzen neue Start-Ups insbesondere auf eine zunehmende Digitalisierung des Handwerks, um die notwendige Beschleunigung der Zubauzahlen, vor allem von PV- und Wärmepumpentechnik, zu realisieren [141, 142].
- Kundenzentrierte Geschäftsmodelle, die konsequent auf IT-Werkzeuge setzen, können signifikante Marktanteile in kurzen Zeiträumen im Stromvertrieb erzielen, wie Unternehmensbeispiele mit einem Marktanteilgewinn von 1 Prozent pro Jahr aus Großbritannien zeigen. Aus IKT-Sicht spielen hier bspw. eigenentwickelte, Cloud-basierte Plattformen eine zentrale Rolle [143].

Bedeutung für Schlüsselakteure der Energiewirtschaft

Wie anhand der oben genannten Fallbeispiele deutlich wird, ist der Einfluss der Digitalisierung auf das Energiesystem mittlerweile nicht mehr wegzudenken. Folglich sind alle Unternehmen der Energiewirtschaft, die nicht konsequent und zielgerichtet in Digitalisierung investieren, in Zukunft sehr wahrscheinlich nicht mehr konkurrenzfähig. Dabei ist zu beachten, dass die klassische Digitalisierung einzelner Prozesse bzw. Wertschöpfungsstufen nicht mehr ausreichend ist. Jetzt gilt es, digital gestützte Wertschöpfungsnetzwerke zu bilden, die über einzelne Akteure hinausgehen, um die Ressourcen und Fähigkeiten gewinnbringend zu verknüpfen.

Zentrale Botschaften an politische Akteur:innen

Behörden, die als zentrale Organe der praktischen Umsetzung der Energiewende fungieren, müssen ebenfalls konsequent ihre Verwaltungsprozesse digitalisieren. Nur dann sind diese in der Lage, die Geschwindigkeit der Prozessneugestaltung in den energierelevanten Unternehmen ziel führend zu begleiten. Ein passendes Zielbild könnte bspw. die vollständige, automatisierte Baugenehmigung einer öffentlichen Ladeeinrichtung sein.

Zentrale Handlungsempfehlungen

Jeder für die Energieversorgung relevante Akteur:in sollte die Digitalisierung als iteratives »Kerngeschäft« betrachten, denn diese wird einen wesentlichen Beitrag zur Realisierung einer effektiven sowie effizienten Umsetzung der Energiewende liefern. Dabei muss das Leitbild eines Echtzeitemergiesystems die prägende Ausrichtung sein.

Grundsätzlich ist es als Gesetzgeber zentral, die Digitalisierung schwerpunktmäßig bei regulierten Prozessen einzufordern. Ein, seit Kurzem im §14e EnWG berücksichtigtes, Praxisbeispiel ist der zunehmende Einsatz von Webportalen zur Bearbeitung von Netzanschlussbegehren (z. B. von bis 30 Kilowatt EEG-Anlagen). Die Genehmigung konnte nach Erfahrungen von Anwendenden von ca. acht Wochen Bearbeitungszeit auf bis zu eine Minute reduziert werden.

Bei der Einführung solcher Instrumente ist allgemein zu beachten, dass die Regulierung technologieoffen zu gestalten ist, sodass die Energiebranche weitestgehend frei eigene, möglichst kosteneffiziente Lösungen entwickeln kann. Alternativ ist es möglich, wie beim §14e EnWG geschehen, erfolgreiche Ansätze einzelner Akteure auf die gesamte Branche zu übertragen. Nach einer Implementierung sind nichtsdestotrotz entsprechende Lösungen regelmäßig zu hinterfragen und somit ggf. zu erneuern [144, 145].

These 3: Ein souveränes und resilientes europäisches Energiesystem benötigt eine EU-Basis-IKT

Kurzerläuterung

Unter der Annahme, dass die Digitalisierung in der Energiewirtschaft voranschreiten wird, ist mit einer Zunahme der Abhängigkeit einer sicheren Energieversorgung von der Funktionsfähigkeit einer Basis-IKT anzunehmen. In diesem Fall sind hierunter vor allem folgende Komponenten zu verstehen: Plattformen, Infrastrukturkomponenten, Datenmodelle, Sicherheitsarchitekturen sowie Schnittstellenlösungen (bspw. im Datenraumumfeld IKT-Komponenten der International Data Spaces Vereinigung).

Insofern diese Komponenten europäischen Anforderungen genügen müssen (bspw. im Sinne der DSGVO), sowie auch mit mindestens treibender europäischer Beteiligung entstehen, bilden sie jeweils Schritt für Schritt einen wichtigen Baustein für die Europäische Energiesouveränität und Resilienz. Folgende Schlüsselfaktoren sollten in diesem Zuge exemplarisch eine Rolle spielen:

- Anwendung vom »Public Money – Public Code« Prinzip zur Unterstützung von öffentlichen Infrastrukturen sowie von nachhaltigen IKT-Infrastrukturen [146].
- Open Source unterstützt die Abhängigkeit von einzelnen Akteur:innen (»Bottlenecks«), vor allem im Bereich der kritischen Infrastruktur, zu minimieren.

Europäisches Know-How ist als Grundvoraussetzung dieser Entwicklung zu sehen, die auf wirtschaftlicher aber auch auf politischer Seite Aktionen erfordert. Dabei steht im Zentrum dieser Aktivitäten eine Reduktion der Lieferabhängigkeiten zu außereuropäischen Ländern, vor allem in kritischen Infrastrukturen wie dem Energiesektor. Bestenfalls sind diese Abhängigkeiten vor allem bei kritischen Prozessen vollständig auszuschließen oder, als grundsätzliche Alternative, stark zu diversifizieren.

Bedeutung für Schlüsselakteure der Energiewirtschaft

Aktuell gehört die aktive (Weiter-)Entwicklung von Open Source IKT-Komponenten nicht zum Kerngeschäft der Energiewirtschaft. Hier erfolgt eine Transformation hin zu mehr IT-Kompetenz, denn nur dann ist sichergestellt, dass eine kontinuierliche Fortentwicklung als Option zur Verfügung steht, falls außereuropäische Akteure ihre Unterstützung kurzfristig einstellen sollten.

Diese Abhängigkeit zu außereuropäischen Akteuren sollte bei der Abwägung von Investitionsentscheidungen für neue IKT-Komponenten Berücksichtigung finden. Dies bedeutet explizit nicht, dass keine außereuropäischen Kooperationen stattfinden können, jedoch müssen beide Seiten eine substantielle Rolle in den gemeinsamen Aktivitäten einnehmen.

Zentrale Botschaften an politische Akteur:innen

Souveränität und Resilienz sind zwei Ansätze, die ineinandergreifen und sich damit einerseits stützen, aber auch andererseits bedingen. Die COVID-19-Pandemie und der Angriffskrieg Russlands auf die Ukraine haben die gesellschaftlichen Rahmenbedingungen signifikant verändert. Vor allem die Zunahme an Unsicherheiten hinsichtlich der Zuverlässigkeit von Lieferketten, die u.a. die Digitalisierung in Form von Halbleitermangel konkret betrifft, führt derzeit zu Produktionsverzögerungen. Damit diese neuen Zustände weiterhin beherrschbar bleiben, ist auch im Bereich der Digitalisierung ein neues Leitbild zu formen: Die Entstehung einer EU-Basis-IKT [147, 148].

Zentrale Handlungsempfehlungen

Es gilt zur Wahrung der Souveränität sowie zur Steigerung der Resilienz die außereuropäischen Abhängigkeiten innerhalb der kritischen Infrastruktur zu identifizieren. Dies betrifft vor allem kritische Prozesse. Mit der Hilfe zu entwickelnden Aktionsplänen für Notfallsituationen der jeweils betroffenen Akteure existiert die Möglichkeit eine kontinuierliche Bereitstellung von Soft- und Hardware der Basis-IKT weiterhin zu gewährleisten. Dadurch bleiben die IKT-Systeme bzw. zugehörige Lieferketten im Energiesektor wahrscheinlicher funktionsfähig bzw. intakt.

Gleichzeitig sind bereits initiierte Maßnahmen zur Verringerung primär singulärer Abhängigkeiten zu verstetigen und auszuweiten. Ein aktuelles Beispiel ist der zurzeit in Diskussion befindliche »European Chips Act« als Instrument gegen den aktuellen Halbleitermangel. Hinsichtlich einer Ausweitung sollte die gesetzliche Vorgabe sein, dass alle kritischen Prozessabläufe der Energieversorgung ausschließlich in EU-Ländern ablaufen, damit eine Durchsetzung europäischer Grundsätze gewährleistet werden kann.

Weiterhin sollte zu jedem Zeitpunkt die Funktionsfähigkeit der energiewirtschaftlichen IKT in Krisensituationen sichergestellt sein. Dazu gehört sowohl die Fortsetzung der Identifikation als auch Förderung von IKT-freien bzw. armen Lösungen als finaler Fallback-Ansatz zur (partiellen) Sicherstellung der Energieversorgung in Extremszenarien [149, 150].

Außerdem sollte von regulatorischer Seite verstärkt in eine EU-Basis-IKT investiert werden. Hierunter sollten folgende Maßnahmen fallen:

- Die kommende digitale Förderungspolitik, bspw. im Rahmen von Forschungsprogrammen oder Investitionsprogrammen, auf eine verstärkte Open Source Orientierung im Kontext der Basis-IKT-Infrastruktur ausrichten
- Die direkte Unterstützung der Energiewirtschaft durch begleitende Open Source-Programme
- Die Stärkung der europäischen Wertschöpfung im IKT-Sektor, insbesondere durch die In-house-Nutzung von EU basierter IKT in der eigenen Verwaltung

5.2 Schwerpunkt Sektorenkopplung

Durch die intelligente Kopplung der Sektoren Strom, Wärme, Gas, Industrie und Verkehr können durch Synergieeffekte entstehende Flexibilitätspotenziale nutzbar gemacht werden. Diese ermöglichen es, Verfügbarkeit und Bedarfe von Energie zeitlich sowie räumlich besser aufeinander abzustimmen und Schwankungen erneuerbarer Energien effektiv auszugleichen [151]. Die Elektrifizierung ist dabei ein zentraler Aspekt, durch die der Stromsektor einen möglichst großen Teil der anderen Sektoren mit erneuerbar gewonnener Energie versorgen kann [86]. Die digitalisierte und automatisierte Sektorenkopplung stellt somit eine Schlüsseltechnologie zum effizienten Gelingen der Energiewende dar [152].

These 4:

Ohne eine digitalisierte Sektorenkopplung steigen die Kosten der Transformation des Energiesystems erheblich

Kurzerläuterung

Die digitalisierte Sektorenkopplung eröffnet Möglichkeiten zur Schaffung finanzieller Anreize für ein flexibles, netzdienliches Verhalten (Variable Stromtarife, Vermeidung von Infrastruktur- und Netznutzungskosten), Demand Side Management, Vehicle-to-Grid- und Power-to-X-Technologien. Nur mit dem Ausbau der Digitalisierung, d.h. einer konsequenten IKT-Integration zwischen den Sektoren (u. a. standardisierte Datenräume, intelligente Messsysteme, vollumfänglich digitalisierte und automatisierten Prozesse, einer hohen Datenverfügbarkeit, digitale Werkzeuge sowie Energiemanagement- und Steuerungssysteme), wird die Sektorenkopplung wirtschaftlich und schnell umsetzbar sein. Zudem hilft sie die zunehmende Komplexität des Energiesystems zu beherrschen. Ohne Digitalisierung sind diese Aufgaben nicht zu bewältigen und eine mangelhafte Digitalisierung führt zu erheblichen Ineffizienzen und Mehrkosten [153].

Bedeutung für Schlüsselakteure der Energiewirtschaft

Um die Sektoren Strom, Wärme, Industrie und Verkehr nachhaltig und effizient miteinander zu verknüpfen, müssen die Schlüsselakteure Technologien einsetzen, die eine Kopplung der unterschiedlichen Sektoren ermöglichen und Energie integriert betrachten.

Der Einsatz digitaler Technologien trägt dazu bei, die Kosten der Energiewende zu senken, knappe Ressourcen besser sektorenübergreifend einzusetzen, sowie Informationen schneller auszutauschen. So rücken Hemmnisse, wie fehlende Interoperabilität, fehlende Möglichkeiten für koordinierten Betrieb von Technologien unterschiedlicher Sektoren, unzureichende Einsatz- und Vermarktungsmöglichkeiten von Sektorenkopplungstechnologien, fehlende Akzeptanz [86], sowie eine darauf basierende Steuerung von Anlagen, in den Fokus von Akteuren wie Erzeugern, Versorgern, Netzbetreibern, Anbietern und Nutzer:innen von Sektorenkopplungstechnologien und Planungsdienstleistungen.

Dabei ist eine digital gestützte Nutzung von Synergien zwischen den Sektoren, mit den Bereitstellungsoptionen erneuerbarer Energien und den sektorenübergreifenden Energiebedarfen, anzustreben. Das Ziel ist eine direkte Energienutzung zum Zeitpunkt der Erzeugung, was zu geringerem Bedarf an Zwischenspeicherung und damit verbundenen Verlusten führt. Mit einer effizienten und räumlich koordinierten digitalisierten Sektorenkopplung ergeben sich eine Reihe von Chancen für neue zukunftsfähige Geschäftsmodelle, zur Erhöhung der Übertragungskapazitäten des

elektrischen Versorgungsnetzes und zur Verbesserung der Resilienz des Gesamt-Energiesystems [86].

Zentrale Botschaften an politische Akteur:innen

Der Primärenergiebedarf und die energiebedingten CO₂-Emissionen müssen reduziert und die Unabhängigkeit von fossilen Energieträgern gesteigert werden. Diesbezüglich gilt als Grundvoraussetzung, dass die Digitalisierung im Bereich der Energieinfrastrukturen beschleunigt wird. Dies wäre etwa durch die Schaffung von Anreizen und Geschäftsmodellen für umfangreichen Roll-Out von IKT-Strukturen und Sektorenkopplungstechnologien oder durch die Förderung von Technologieentwicklung möglich. Außerdem wird empfohlen, die Smart Meter-Infrastruktur, als digitale Basisinfrastruktur für alle Sektoren zügig weiterzuentwickeln und Alternativen in Betracht zu ziehen (siehe These 7). Auch die Schaffung eines innovativen Rahmens für nachhaltige Digitalisierung sowie das Vorantreiben von Open Data sind notwendig. Nicht zuletzt sind die Gestaltung einer wettbewerbskonformen Datennutzung sowie eine Personal- und Modernisierungsoffensive der öffentlichen Verwaltung auf allen Ebenen wie auch die feste Verankerung der Digitalkompetenz in Bildung, Forschung und Verwaltung zu betonen. Erst wenn diese Voraussetzungen erfüllt sind, kann eine energetisch und ökonomisch effektive Sektorenkopplung gelingen und damit eine Integration hoher Anteile erneuerbarer Energien in das Energiesystem.

Zentrale Handlungsempfehlungen

Die digitale Sektorenkopplung und somit umfassende Betrachtung des Energiesystems sind anzustreben. Dabei müssen eine konsequente IKT-Integration zwischen den Sektoren, vollumfänglich digitalisierte Prozesse mit hohem Automatisierungsgrad sowie eine Erhöhung der Datenqualität und Quantität im Energiesystem gefordert und gefördert werden.

Die Steuerbarkeit sollte dabei als Vorgabe für alle relevanten Anwendungen und Anlagen Voraussetzung sein. Projekte, die alle energierelevanten Sektoren berücksichtigen und koppeln, sollten in den Fokus der Förderung rücken. Zusätzlich ist die Schaffung und der Ausbau von Bildungsmöglichkeiten zur Förderung von systemischem Planungs- und Umsetzungsverständnis für digitalisierte sektorenübergreifende Konzepte notwendig.

These 5:
Tragfähige energiewirtschaftliche Geschäftsmodelle für eine digitalisierte Sektorenkopplung auf Quartiersebene scheitern derzeit an regulatorischen Hürden

Kurzerläuterung

Auf der Quartiersebene (hier verstanden als kleinste Maßstabsebene des Energiesystems, in der mehrere räumlich zusammenhängende Gebäude einschließlich der öffentlichen Infrastruktur enthalten sind) kommen die Sektoren (Strom, Wärme, Mobilität und aktuell Gas) zusammen. Für einen effizienten Betrieb des Energiesystems ist es wichtig, dass mit Hilfe der Sektorenkopplung die notwendige dezentrale Flexibilität der kleinteiligen Versorgungsstruktur bei geografischer Diversität zu erschließen.

Durch einen lokalen Ausgleich von Energieflüssen und die Erhöhung der Eigenversorgungsquote können Synergieeffekte genutzt und so ökonomische Vorteile durch Effizienzsteigerung und Vermeidung von Infrastruktur- und Netznutzungskosten höherer Infrastrukturebenen erzielt werden. Um Lösungen für ein lokales Energiemanagement zu etablieren, ist ein hoher Grad an Automatisierung und Digitalisierung die Voraussetzung, um die Kosten und der Aufwand für die Betreiber zu minimieren und so eine Wettbewerbsfähigkeit zu realisieren. Tragfähige digitale Geschäftsmodelle für die Energiewirtschaft auf Quartiersebene werden allerdings derzeit durch regulatorische Hürden stark gebremst oder scheitern gänzlich daran (z. B. Netzentgelte spiegeln nicht tatsächlichen Netznutzung wieder, Steuern / Abgaben / Umlagen sind über verschiedene Energieträger hinweg uneinheitlich, Wechsel zwischen Vermarktungsmodellen von erneuerbare Energieanlagen ist nicht möglich, Doppelte Abgaben-Last für dezentrale Speicher, unübersichtliche Vielzahl unterschiedlicher Gesetze und Fördermechanismen). Die regulatorischen Voraussetzungen für Geschäftsmodelle auf Quartiersebenen sind derzeit nicht gegeben, sodass digitale Lösungen als Grundlage von Geschäftsmodellen ihre Vorteile bezüglich Automatisierungsgrad und intelligenter Methoden nicht ausspielen können und so die Erschließung von Flexibilitätspotenzialen der Quartiersebene hemmen [154–157].

Bedeutung für Schlüsselakteure der Energiewirtschaft

Quartierslösungen erhöhen die Integrationsfähigkeit von erneuerbaren Energien für das gesamte Energiesystem [156, 157] und ermöglichen ein netzverträgliches Quartiersverhalten. Allerdings werden Innovationen durch die derzeitigen regulatorischen Rahmenbedingungen und organisatorischen Aufwände für die Marktteilnehmenden erschwert. Beispielsweise ist ein Strom-Wärmegekoppelter Quartiersansatz, bei dem Strom und Wärme innerhalb des Quartiers zwischen Gebäuden ausgetauscht werden, aufgrund der bestehenden regulatorischen Rahmenbedingungen bislang nicht möglich.

Aus Sicht der Akteure sind die relevanten Gesetze des Rechtsrahmens (EnWG, StromStG, GEG, GEIG, EWG und KWKG) bezüglich eines Quartiers durch große Unterschiede und je nach Gesetz unterschiedliche Rechtsfolgen geprägt. Derzeit zielt kein Gesetz auf eine Nutzung lokaler Potenziale im Quartier ab, obgleich hier Potenziale einer klimaneutralen Energieversorgung brachliegen.

Für das Quartier relevante Gesetze unterliegen unterschiedlichen Regulierungszielen, sodass Quartiere allen Beteiligten gerecht werden müssen [158]. Akteuren wie Quartiersbetreibern, Stadtwerken, Kommunen, Netzbetreibern, Anbietern und Nutzer:innen von Sektorenkopplungstechnologien und Energie und Planungsdienstleistungen bleibt aktuell nur die Möglichkeit im bestehenden Rechtsrahmen tragfähige digitalisierte Quartierskonzepte mit Sektorenkopplung zu finden und Anpassungen am regulatorischen Rahmen genau zu beobachten.

Zentrale Botschaften an politische Akteur:innen

Quartiere können zum Gelingen der Energiewende eine wichtige Rolle einnehmen, da sie neue Effizienzpotenziale und Handlungsoptionen auf lokaler und regionaler Ebene eröffnen. Ökonomisch tragfähige Quartierskonzepte sind notwendig für den Transformationsprozess des Energiesystems und steigern nachweislich dessen soziale Akzeptanz [158].

In der Umsetzung sind Quartierslösungen bisher aber nur eine Randerscheinung mit engen Grenzen bezüglich Genehmigungsverfahren und Zusatzanforderungen. Energiewirtschaftliche Geschäftsmodelle auf Quartiersebene sind derzeit nicht tragfähig, da es aktuell keine wirtschaftlich verwertbaren Möglichkeiten für den lokalen Austausch und Ausgleich von Energie gibt (z. B. sind Infrastruktur- und Netznutzungskosten bei Nutzung des öffentlichen Stromnetzes derzeit nicht auf die entsprechende Netzebene beschränkt). Es gibt somit derzeit keine Motivation zum netzverträglichen und netzdienlichen Verhalten auf Quartiersebene. Der derzeitige regulatorische und

organisatorische Rahmen und dessen Unübersichtlichkeit stellen für die Marktteilnehmende eine abschreckende Hürde dar.

Zentrale Handlungsempfehlungen

Die Energiewirtschaft ist so stark reguliert, wie kaum eine andere Branche. Der Durchbruch digitaler Innovationen wird durch diese engen Grenzen der Regulierung erschwert - auch im Bereich der Quartiere. Regulatorische und organisatorische Anforderungen müssen vereinheitlicht und abgebaut werden.

Es müssen Voraussetzungen geschaffen werden, um netzverträgliches Verhalten mit Quartierslösungen zu motivieren (z. B. Infrastruktur- und Netznutzungskosten bei Nutzung des öffentlichen Stromnetzes auf die entsprechende Netzebene beschränken). Weiterhin muss ein innovationsfreundlicher regulatorischer Rahmen für tragfähige energiewirtschaftliche Geschäftsmodelle auf Quartiersebene realisiert werden. Um eine für das Gelingen der »Energiewende vor Ort« notwendige Steigerung der Nutzerakzeptanz zu erreichen, müssen bspw. Innovationen für nutzer- bzw. verbraucherfreundliche Geschäfts- und Tarifmodelle gefördert werden, welche die vorrangige Nutzung lokal erzeugter erneuerbarer Energien stärken.

These 6: Eine effiziente Dekarbonisierung des Wärmesektors ist nur mit Digitalisierung zu erreichen

Kurzerläuterung

Zur effizienten Dekarbonisierung des Wärmesektors ist es notwendig, Anlagen vernetzt und intelligent zu steuern und so Synergien und Flexibilität durch Elektrifizierung der Wärmeversorgung, Wärmespeicher und Stromnetzverträglichkeit in Kombination mit intelligentem Management zu erschließen. Nur so und mit der Integration von Schlüsseltechnologien (Niedertemperatur-Wärmenetze, effiziente Wärmepumpen, Solarkollektoren, dezentrale Einspeisung und Abwärmenutzung) kann die Einbindung von erneuerbaren Energien und KWK im großen Maßstab erfolgreich sein. Bisher ist jedoch kaum Digitalisierung im Wärmesektor im Einsatz, weder beim Betrieb der Wärmenetze, -erzeuger und -speicher noch im Bereich der Infrastrukturplanung [159–163].

Bedeutung für Schlüsselakteure der Energiewirtschaft

Auf den Wärmesektor entfällt knapp die Hälfte des deutschen Energieverbrauchs. Ein wesentlicher Ansatzpunkt zur Dekarbonisierung ist eine verstärkte Integration erneuerbarer Energien und CO₂-freier Wärme in den Wärmesektor. Wärmeversorger, -erzeuger und -netzbetreiber stehen vor der Aufgabe dezentrale, teilweise fluktuierende Einspeisung einzubinden. Die Transformation hin zu Wärmenetzen der 4. Generation [164] stellt die Akteure vor die Herausforderungen der Steigerung der Energieeffizienz, vermehrter Integration nachhaltiger Wärmequellen (z. B. erneuerbare Energien oder Abwärme aus der Industrie), der Abkehr von zentralen Erzeugungskonzepten, dem Zugang Dritter bzw. Prosumer oder der Kopplung mit anderen energierelevanten Sektoren.

Durch Diversifizierung, Dezentralisierung, Flexibilisierung und Dekarbonisierung der Wärmebringung werden tiefgreifende Restrukturierungsmaßnahmen erforderlich [163]. Akteure müssen sich zum Handling großer Datenmengen und intelligenter Steuerungen mit einem verstärkten

Einsatz und der Nutzung intelligenter Messsysteme und der darauf aufbauenden digitalen Abbildung der Netzinfrastruktur sowie digitalen Technologien für den Wärmemarkt auseinandersetzen [160].

Der Wärmesektor hat immensen Digitalisierungsbedarf entlang der gesamten Wertschöpfungskette. Grundvoraussetzung zur Nutzung digitaler Technologien ist eine gut gemanagte und möglichst automatisierte Datenerfassung. Zudem macht der gezielte Einsatz moderner Digitalisierungswerkzeuge operative Optimierungen und Interaktionen zwischen Systemen sowie angepasste Geschäftsmodelle erst plan- und steuerbar [163].

Zentrale Botschaften an politische Akteur:innen

Die Digitalisierung und Vernetzung im Wärmesektor ist zukunftsweisend und sollte so schnell wie möglich angestrebt werden. Es bedarf großer Anstrengungen bezüglich Aufklärung, Verbreitung und Umsetzung, die schnellstmöglich angegangen werden müssen. Die Akteure müssen die derzeit noch fehlende Expertise zur Digitalisierung erst aufbauen.

Die Akteure sind motiviert, Digitalisierungsmaßnahmen zügig umzusetzen. Allerdings ist die Realisierung von Digitalisierungsprojekten ohne Förderung von Innovationen und Investitionen problematisch. Beispielsweise bedarf es der Förderung von Forschung und Entwicklung in den Bereichen Sensorik, Aktorik, Steuerung und Regelung sowie der Fortführung und des Ausbaus der relevanten Förderinstrumente, etwa durch BEW-Bundesförderung für effiziente Wärmenetze. Zudem sollte die Umsetzung von Digitalisierungsprojekten bspw. im Rahmen von Reallaboren gefördert und erprobt werden.

Zentrale Handlungsempfehlungen

Digitalisierungsmaßnahmen können die Kenntnis über den Netzzustand erheblich verbessern, wodurch sich Optimierungspotenziale heben lassen. Insbesondere können Potenziale durch den Einsatz digitaler Technologien im Zusammenspiel mit der verstärkten Nutzung von intelligenten Messstellen erschlossen werden [161]. Es besteht allerdings Handlungsbedarf bezüglich höherer Digitalisierungsraten.

Die Förderung von Innovationen und Investitionen in nachhaltige Versorgungskonzepte auf kommunaler Ebene kann Abhilfe schaffen. Gleiches gilt für verbesserte Planungssicherheit zur Verbesserung der Mess- und IKT-Infrastruktur, sowie zum Ausbau der Fern- und Nahwärmeinfrastruktur. Weitere Handlungsempfehlungen sind die Förderung von Forschung und Entwicklung sowie Investitionen und Forschungsaktivitäten in die Digitalisierung des Wärmesektors zu erhöhen (wie bspw. die KfW Energieeffizienzprogramme mit Smart Home EMS zu verknüpfen oder Anreize zur Gebäudesanierung mit Digitalisierungsansätzen zu verknüpfen).

5.3 Schwerpunkt Anlagenkommunikation

Die Anlagenkommunikation, die die zukünftigen Akteure des Energiesystems miteinander verbindet, unterliegt zukünftig noch höheren Anforderungen an Zuverlässigkeit und Resilienz. Ein Energiesystem, das auf der Orchestrierung von regenerativen Erzeugern und steuerbaren Lasten basiert, benötigt eine zuverlässige Steuerung, die niedrige Ausfallraten und bei Störungen resiliente Rückfallebenen, aufweist.

These 7: Das intelligente Messsystem wird in der Anlagenkommunikation von anderen Lösungen überholt

Kurzerläuterung

Die Wirksamkeit des Smart Meter Roll-Outs hängt maßgeblich von den dadurch geschaffenen Mehrwerten ab. Der Mehrwert für Stromnetzbetreiber besteht abseits des Planungswesens in der erhöhten Beobachtbarkeit und Steuerbarkeit der Netze über alle Spannungsebenen hinweg. Hierzu fehlen in der aktuellen Generation, trotz technischer Umsetzbarkeit, unkomplizierte Möglichkeiten zur Nutzung der erhobenen Daten im Live-Betrieb. Symptomatisch für das Verfehlen des Ziels des Rollouts ist, dass Parallelkanäle (bspw. herstellerseitige Backendsysteme oder Home Energy Management Systeme abseits des SMGW) zunehmend eingesetzt werden, um Bewegungsdaten aus dem Anlagenbetrieb zu erheben.

Die Kosten des Roll-Outs intelligenter Messsysteme stehen dabei in einem schlechten Verhältnis zum potenziellen Impact, der sich in der aktuellen Generation im Wesentlichen bei Einsparungen im Personaleinsatz im Messstellenbetrieb zeigt. Vordergründig wird das intelligente Messsystem im Stromsektor betrachtet, die anderen Sektoren (Gas, Wärme, Wasser) werden bislang nachrangig zum Strom behandelt.

Bedeutung für Schlüsselakteure der Energiewirtschaft

Netzbetreiber können sich nicht allein auf den Smart Meter Roll-Out als effiziente Datenquelle verlassen, sondern sollten insbesondere auch die parallelen Datenkanäle, bspw. Cloud-Backendsysteme von Anlagenherstellern in Erwägung ziehen. Gegebenenfalls sind für Netzbetreiber auch einzelne Stützpunkte aus Datensätzen intelligenter Messsysteme ausreichend. In diesem Zuge gilt es jedoch auch den Zugang zu diesen Messdaten zu vereinfachen.

Gemeinsam mit Politik und Regulierung sollten praktikable Konzepte entwickelt werden, die eine effiziente Datenkommunikation ermöglichen, weiterhin aber die Schutzziele wie bspw. Datenvertraulichkeit aufrechterhalten. Es sollte für Netzbetreiber praktikabel und wirtschaftlich sein, für die Zwecke von Netzplanung und -betrieb auf Anlagenstamm- und -bewegungsdaten zurückzugreifen. Dabei gilt es aus Datenschutzgründen eine bedarfsgerechte zeitliche und räumliche Granularität zu identifizieren.

Zentrale Botschaften an politische Akteur:innen

Die Rolle des intelligenten Messsystems und insbesondere des Smart Meter Gateways, das unter hohen Sicherheitsanforderungen entwickelt und in den Markt gebracht wurde, sollte vor dem Hintergrund der Herausforderungen beim Roll-Out und der zwischenzeitlichen Marktdurchdringung paralleler Kommunikationskanäle weiterentwickelt werden. Das Smart Meter Gateway kann

weiterhin die Rolle als Vertrauensanker in einer Systemarchitektur einnehmen, in der Bewegungsdaten aus Anlagen auch über andere Kanäle geleitet werden.

Zentrale Handlungsempfehlungen

Auf Basis der zuvor beschriebenen Ausgangslage, konnten folgende zentrale Empfehlungen identifiziert werden:

- Die Umsetzung von technischen Lösungen zur betreiberübergreifenden Kommunikation (bspw. zwischen Leitsystemen und Herstellerbackendsystemen) sollte gefördert werden
- Die grundsätzlich wichtigen Anforderungen an Sicherheit und Datenschutz, die an Smart Meter Gateway-Infrastruktur gestellt werden, sollten auch für die beschriebenen Parallelinfrastrukturen – ggf. in angepasster Form – gelten
- Das Smart Meter Gateway sollte als Ergänzung zu im Markt entstehenden Parallelinfrastrukturen gesehen werden

These 8: Die Energiewende braucht Anlagenkommunikation basierend auf aktuellen IT-Technologien und offener Dokumentation

Kurzerläuterung

Die Standardisierung im Bereich der Anlagenkommunikation hält weder mit dem aktuellen noch dem zukünftigen Kommunikationsbedarf Schritt. Zwar müssen nicht interoperable, proprietäre Umsetzungen seitens einzelner Akteure vermieden werden, aktuelle Bestrebungen zur Standardisierung sind jedoch bis auf wenige Beispiele viel zu langsam. Aktuell basiert die Anlagenkommunikation auf der Umsetzung von proprietären Datenmodellen auf Grundlage in die Jahre gekommener Kommunikationsprotokolle (IEC 60870-5-104, Modbus TCP). Die Ergebnisse von jüngeren Standardisierungsbemühungen (IEC 61850, IEC 61400-2) findet in der Praxis wenig Anwendung [165]. Aus diesem Grund geht oftmals ein Großteil der Zeit und damit auch des Budgets von Digitalisierungsprojekten in den Aufbau der Kommunikation zu den Anlagen. Dies führt dazu, dass viele neue Technologien nicht in Gänze für die Energiewirtschaft evaluiert werden können.

Zur Umsetzung der Energiewende mit der erforderlichen Geschwindigkeit ist es erforderlich, dass Standardisierung die Innovationsgeschwindigkeit technologischer Fortschritte unterstützt. In anderen Branchen hat sich vermehrt die branchenweite Durchsetzung von erweiterbaren de-facto Standards als Vorgehensweise etabliert (bspw. Webtechnologien).

Bedeutung für Schlüsselakteure der Energiewirtschaft

Die beteiligten Akteure, insbesondere Hersteller sowie Infrastruktur- und Plattformbetreiber müssen sich auch eine erhöhte Innovationsgeschwindigkeit im Bereich der Anlagenkommunikation einstellen, da zukünftige Anforderungen erst in den nächsten Jahren konkretisiert werden. Um Interoperabilität zwischen Komponenten zu ermöglichen, sollten Betreiber Wert darauflegen, dass Komponenten erweiterbare, klar definierte Standards verwenden und die genutzten Datenmodelle und Semantiken offen dokumentiert sind. Bezüglich der Kommunikationsprotokolle sollte ein Wechsel zu flexibel einsetzbaren Webtechnologien vollzogen werden, um aufkommende Anforderungen reagieren zu können.

Zentrale Botschaften an politische Akteur:innen

Standardisierungsprozesse, die mit der benötigten Geschwindigkeit der Digitalisierung des Energiesystems nicht mithalten können, sind als Hindernis zu sehen. Standardisierung, die schnell auf neue Anforderungen reagiert, und maßgeblich von Herstellern und Betreibern zusammen entwickelt wird, kann die Interoperabilität steigern. Zentral ist in jedem Fall jedoch, dass Schnittstellen zur Anlagenkommunikation auf moderne Kommunikationstechnologien aufsetzen und die verwendeten Datenmodelle offengelegt werden.

Zentrale Handlungsempfehlungen

Die Entwicklung interoperabler Datenmodelle und Kommunikationsschnittstellen sollte gefördert werden. Hersteller sollten auf etablierte Technologien aufbauen. Die Dokumentation von Datenmodellen ermöglicht es auch Dritten Interoperabilität zwischen Komponenten zu schaffen, auch wenn Datenmodelle keiner einheitlichen Semantik folgen.

These 9: Moderne Anlagenkommunikation ist Plug & Play-fähig und ermöglicht akteursübergreifende Prozessautomatisierung

Kurzerläuterung

Die kontinuierlich ansteigende Anzahl von heterogenen Anlagen im Energiesystem muss zunehmend besser aufeinander abgestimmt werden, um den sicheren, zuverlässigen und ökologischen Systembetrieb zu gewährleisten. Die Abstimmung erfolgt zunehmend algorithmisch, wobei im Sinne der Anlageneigentümer unterschiedliche Ziele verfolgt werden. Die Integration der Anlagen in das Gesamtsystem und die Vielfalt der Einsatz- und Vermarktungsoptionen, zwischen Eigenverbrauchsoptimierung und Netz-/Systemdienstleistungen (auch bekannt als »Multi-Use Anlagen-einsatz«) bedarf vereinfachter und automatisierbarer Prozesse.

Eine Möglichkeit, um Anlageneigentümern die Teilnahme an unterschiedlichen Koordinationsprozessen und Märkten zu bieten ist die Nutzung von Maschinenidentitäten, mithilfe derer Teilnahmeprozesse (bspw. Qualifikation für Systemdienstleistungen, Anmeldungen und Abmeldungen) automatisiert abgewickelt werden können und Bewegungsdaten zuverlässig Anlagenstammdaten zugeordnet werden können [166]. Diese Prozesse ermöglichen in Zukunft eine Plug & Play-Integration von Komponenten im Energiesystem und während der Betriebsdauer die Teilnahme an unterschiedlichen Koordinationsprozessen.

Bedeutung für Schlüsselakteure der Energiewirtschaft

Die zukünftigen Vermarktungsplattformen für Systemdienstleistungen müssen darauf vorbereitet sein, dass Anlagen, die Systemdienstleistungen bereitstellen, zwischen unterschiedlichen Plattformen und Produkten wechseln. Märkte und Vermarktungsplattformen sollten diese Wechsel mit automatisierbaren Schnittstellen unterstützen, die die An- und Abmeldung und Qualifikation für die entsprechenden Systemdienstleistungen ohne Nutzerinteraktion des Anlageneigentümers ermöglichen. Hierfür ist insbesondere die Identifikation und Verifikation der beteiligten Anlagen zu automatisieren und eine Doppelvermarktung auszuschließen.

Ein Wettbewerbsvorteil für Hersteller kann die Unterstützung unterschiedlicher Produkte an Energie- und Systemdienstleistungsmärkten sein. Bei der Entwicklung von Komponenten sind daher

die Einsatzmöglichkeiten aus Sicht der Prosumer zu berücksichtigen und entsprechende technische Möglichkeiten vorzusehen.

Zentrale Botschaften an politische Akteur:innen

Für technologisch mögliche und wirtschaftlich attraktive Einsatzmodelle in einem Energiesystem bestehend aus Millionen dezentraler Energiewandlungsanlagen müssen regulatorische Rahmenbedingungen geschaffen werden. Die Prozesse zur Marktteilnahme und für Wechsel von Vermarktungsvarianten müssen entbürokratisiert und automatisiert werden.

Auf der mit dem Marktstammdatenregister geschaffenen Grundlage sollte aufgebaut werden. Neben Stammdaten werden in einer zunehmend dynamischen Zuordnung zwischen Anlagen und Vermarktungsoptionen auch Bewegungsdaten an Bedeutung gewinnen.

Zentrale Handlungsempfehlungen

Es gilt, zukünftige Markt- und Systemkonzepte für ein dezentral geprägtes Energiesystem zu erproben. Besonderes Augenmerk sollte dabei auf der Interoperabilität, Skalierbarkeit und Sicherheit des vernetzten Gesamtsystems liegen.

Die Forschung zu Datenräumen und Digitalen Identitäten für Anlagen kann dabei helfen, heutige regulatorisch vorgeschriebene Prozesse weiterzuentwickeln und eine Dynamisierung des Systems zu ermöglichen.

5.4 Schwerpunkt Netzbetrieb und -planung

Stromnetze sind das Rückgrat des Energiesystems. Für den Betrieb der Netze sind Übertragungsnetzbetreiber (ÜNB) und Verteilnetzbetreiber (VNB) verantwortlich. Diese Verantwortung umfasst allerdings weit mehr als die Sicherstellung der Betriebsfähigkeit der technischen Betriebsmittel. In Deutschland gibt es vier Übertragungsnetzbetreiber, die die Systemverantwortung für die Betriebsführung tragen, also Ausgleichsmechanismen bei Netzschwankungen zu beschaffen und zur Verfügung zu stellen, für eine bedarfsgerechte Instandhaltung und Ausbaumaßnahmen zu sorgen und im Falle eines Blackouts den Wiederhochlauf zu organisieren. Die Verteilnetzbetreiber, von denen es in Deutschland derzeit 872 gibt, betreiben Hoch-, Mittel- und Niederspannungsnetze. Sie sind verantwortlich für Sicherstellung von Schutz und Sicherheit sowie die weitsichtige Planung und Umsetzung von Netzausbau und Anschlussgesuchen und müssen in vielen Situationen eng mit dem ÜNB kooperieren. So wird mit Einführung von Redispatch 2.0 die Aufgabe, regionale Netzüberlastungen zu beseitigen, auf ÜNB und VNB verteilt. Es sind nun auch erneuerbare Energien- und Kraft-Wärme-Kopplung-Anlagen ab 100 Kilowatt verpflichtend für diese Zwecke fernsteuerbar anzubinden. Insgesamt werden die Aufgaben der ÜNB und VNB signifikant komplexer und müssen nichtsdestotrotz strukturiert in Prozessen und Schnittstellen abgebildet sein – eine enorme Herausforderung.

These 10:

Digitalisierung ist Kernkompetenz im zukünftigen Stromnetzbetrieb

Kurzerläuterung

Mit der dezentral geprägten Energiewende ändert sich die Aufgabe der Verteilnetzbetreiber. Während Anlagen heute zum Großteil passiv betrieben werden und in der Regel nur begrenzt zur Systemstabilität und -sicherheit beitragen, wird zukünftig der Netzbetrieb anspruchsvoller, die Komplexität nimmt signifikant zu. Netzbetriebsmittel können und müssen bspw. abhängig vom Wetter oder der Jahreszeit anders parametrisiert werden, um die Spannung bei wechselnder Einspeiseleistung innerhalb der erlaubten Grenzen zu halten, Ausfälle oder Engpässe von Betriebsmitteln können ggf. durch die Verbindung oder Trennung von Netzsträngen behoben werden [167–169].

Die Relevanz der unteren Spannungsebenen für einen stabilen Betrieb des Stromversorgungssystems steigt gleichzeitig deutlich, eine Trennung einer Verteilnetzmasche vom Verbundnetz hat einen größeren Einfluss auf die überlagerten Ebenen als früher. Ein passiver oder sogar blinder Betrieb der Netze ist nicht mehr möglich. Für eine aktive Betriebsführung müssen Anlagen sowie die Netzebenen und -gebiete in die digitalen Netzmodelle der Netzbetreiber aufgenommen werden und es müssen Prozesse zur Steuerung und Abstimmung eingeführt werden. Mit der notwendigen Anreizregulierung in Richtung aktivem Betrieb und Hochautomatisierung verändern sich die Kernprozesse, die Wertschöpfung und die Abhängigkeit von Digitalisierungskompetenzen der Netzbetreiber grundlegend. Netzbetreiber müssen sich darauf einstellen, eigene Prozesse auf- und umzusetzen oder Kooperationen einzugehen.

Bedeutung für Schlüsselakteure der Energiewirtschaft

Die Digitalisierung der Prozesse in der Betriebsführung ist eine komplexe Aufgabe, die insbesondere für kleinere Netzbetreiber schwer zu leisten ist. Bei begrenzten personellen Ressourcen und fehlenden Kompetenzen werden diese Tätigkeiten fremdvergeben oder in Kooperation erledigt.

Insbesondere kleinere Netzbetreiber werden sich zu größeren Gemeinschaften zusammenschließen müssen, um das Know-How sowie Ressourcen zu teilen, Synergien in den Prozessen auszunutzen, aber auch um konkurrenzfähig gegenüber bereits jetzt bestehenden großen Netzbetriebsgesellschaften zu bleiben oder es zu werden.

Konsequenterweise führt dies aller Wahrscheinlichkeit nach zu einer Konsolidierung. Durch die Umstellung auf einheitliche, größtenteils automatisierte Betriebsführungsprozesse, wird die Kernaufgabe von insbesondere Stadtwerken und kommunalen Netzbetreibern im Wesentlichen auf dem Verwalten und Betreiben der Netzelemente, also dem »Assetmanagement«, liegen. Die Abhängigkeit von den digitalen Prozessen und somit auch von deren Anbietern steigt massiv an, was für einen unabhängigen Netzbetrieb kritisch werden kann.

Zentrale Botschaften an politische Akteur:innen

Aktuell wird, besonders bei den kleineren und kommunalen Netzbetreibern, nicht genug in die Digitalisierung investiert. Um dies zu incentivieren, fehlen die Anreize und Möglichkeiten, anfallende Kosten und Investitionen umzulegen und anrechnen zu lassen [170]. Auch sollte die gemeinsame Arbeit der relevanten Stakeholder, die an der Digitalisierung des Netzbetriebes beteiligt sind und zukünftig beteiligt sein werden, noch stärker motiviert werden, um die verschiedenen Bereiche des Netzbetriebes (inklusive der im Feld befindlichen Technologien) stärker aufeinander abzustimmen und interoperabel zu machen. Dieses ist ein wichtiger Baustein um auf die Herausforderungen der Energiewende, speziell in der Niederspannung, zu reagieren.

Als Vorbild können Modellprojekte stärker animiert und unterstützt werden, die dann als Vorlage für Netzbetreiber und Hersteller dienen. Des Weiteren ist es von großer Wichtigkeit kompetenten Nachwuchs auszubilden und aktuelles Personal für die neue digitale Herausforderung weiterzubilden.

Zentrale Handlungsempfehlungen

- 1) Für eine Beschleunigung der Energiewende ist eine stärkere Kooperation sowie gemeinsame digitale Produkte der Netzbetreiber förderlich
- 2) In Zukunft müssen Anreize, Förderung und Planungssicherheiten für Investitionen in Digitalisierung und Kompetenzaufbau bei Netzbetreibern und allen anderen Stakeholdern geschaffen werden.
- 3) Hierzu schlagen wir weiterhin Programme für Kooperationen und strategische Partnerschaften zur Beschleunigung durch gegenseitigen Austausch von Erfahrungen und Best-Practice Beispielen vor.
- 4) Der Kompetenz- und Personalaufbau muss so schnell wie möglich passieren. Entsprechende Kapazitäten bei Ausbildungs- und Hochschulprogrammen müssen erweitert werden.

These 11:

Eine dezentrale Energiewende bedeutet flächendeckende Digitalisierung bis in die unteren Netzebenen

Kurzerläuterung

Die Verteilnetze stehen vor massiven Veränderungen. Bisher waren Lastflüsse unidirektional und gut prognostizierbar, entsprechend konnten die Netze geplant und »blind« betrieben werden. Die

Veränderung des Energiesystems von zentralen Großkraftwerken hin zu einer kleinteiligen, volatilen Erzeugung, neuen, leistungsstarken Verbrauchern und dezentralen Stromspeichersystemen macht eine dynamische, hochautomatisierte Netzbetriebsführung erforderlich, über alle Spannungsebenen hinweg. Insbesondere benötigen Hoch- und Höchstspannung in den nächsten Jahren vermehrt detaillierte Informationen über den aktuellen und geplanten Betrieb der über- und unterlagerten Netze. Dies stellt vor allem für die Mittel- und Niederspannung ein neues Paradigma dar. Grundlegende Voraussetzungen für den aktiven und planbaren Netzbetrieb sind die Schaffung von mehr Netztransparenz und Steuerbarkeit auch für die Niederspannungsebene zu nennen (siehe hierzu auch §14a,b EnWG). Das Monitoring von Assets und Netzstrukturen sowie die Ermittlung des Netzzustandes in Echtzeit sind essenzielle Funktionalitäten, die bisher aus Kosten/Nutzen-Erwägungen in den Verteilnetzen quasi nicht implementiert sind. Eine vollständige Digitalisierung aller Assets, der verfügbaren Kapazität des Netzes der aktuellen Lastflüsse, der Kommunikationsschnittstellen, sowie aller notwendigen Prozesse kann dafür die notwendige Grundlage bilden.

In Engpassfällen oder bei Störungen muss der Netzbetreiber eingreifen können, dafür benötigt er Betriebsdaten und steuernden Zugriff auf relevante Anlagen. Die zügige Einführung von Sensoren zur Netzzustandserfassung, u.a. durch intelligente Messsysteme, ist notwendig, um eine belastbare Datengrundlage zu schaffen und einen sicheren Steuerungskanal für Lastflexibilisierung in Haushalten zu etablieren (vgl. These 7). Der Datenschutz steht heute einer umfangreichen und kosteneffizienten Nutzung von Smart Meter Daten und weiteren Datenquellen (IoT) für den Netzbetrieb allerdings im Weg [33].

Bedeutung für Schlüsselakteure der Energiewirtschaft

Während die Übertragungsnetze bereits lange digital überwacht werden, ist das Niveau der messtechnischen Ausstattung und der Beobachtbarkeit der Niederspannungsnetze sehr gering [171]. Hier werden massive Investitionen in Mess-, Kommunikations- und Steuerungstechnik notwendig. Auch verteilte intelligente Systeme zum Monitoring, der Zustandsermittlung sowie des lokalen Leistungsmanagements sind zukünftige Bestandteile der digitalisierten Netzinfrastruktur.

Die Aufgabe der Verteilnetzbetreiber ändert sich dadurch substantiell und mit hoher Dringlichkeit. Gleichzeitig sind Anreizregulierung und Geschäftsmodelle noch nicht darauf ausgelegt. KI-Techniken können bspw. helfen, mit vergleichsweise wenigen Datenpunkten den Netzzustand abzuschätzen. Messdaten müssen aber auch allen relevanten Akteuren zur Verfügung stehen. Sollte der Übertragungsnetzbetreiber (ÜNB) die Rolle der Datendrehscheibe übernehmen, müsste eine Verteilung der Daten an alle relevanten Stakeholder sichergestellt sein. Dieses sind insbesondere die VNBs, aber auch zukünftige Drittanbieter, die im Rahmen der Digitalisierung Aufgaben des Netzbetriebes und –planung übernehmen (siehe These 10).

Die durchgängige Digitalisierung der Prozesse in den Energieversorgungsnetzen erfordert neue Ansätze in der Kommunikation und Organisation zwischen allen beteiligten Akteuren der Wertschöpfungskette. Hierzu müssen Anpassungen in der Regulatorik für die Bereitstellung, Nutzung und Verfügbarkeit von Energiedaten für den dynamischen Netzbetrieb erfolgen.

Zentrale Botschaften an politische Akteur:innen

Heute sind die Anreize für Investitionen in digital anschlussfähige Systeme (intelligente Ortsnetzstationen, intelligente Aktorik) für Netzbetreiber nicht in ausreichendem Maße gegeben [170]. Investitionen in moderne Mess-, Kommunikations- und Steuerungssysteme sowie in den Einsatz von KI sind aktuell zu niedrig für zukünftige Herausforderungen. Kompetenz- und Wissensaufbau muss kurzfristig und nachhaltig erfolgen. Eine übergeordnete, verbindliche Strategie zur Automatisierung und Flexibilisierung der Verteilnetze ist dringend erforderlich. Marktliche Elemente zur

Hebung von Flexibilitätspotenzialen insb. der Verbrauchsseite müssen gestärkt und intensiviert werden, zum Beispiel durch die Überarbeitung von §14a EnWG (steuerbare Verbrauchseinrichtungen).

Zentrale Handlungsempfehlungen

- 1) Gesetzliche Regelungen müssen Anreize und Planungssicherheit für Investitionen in digital anschlussfähige Systeme schaffen (z. B. intelligente Ortsnetzstationen, Messtechnik, Kommunikationstechnik, Leittechnik)
- 2) Es muss Klarheit zwischen Datenschutz-Grundverordnung und einer notwendigen Datenerfassung für den Netzbetrieb sichergestellt werden, sowie die Regulatorik für Echtzeitmonitoring angepasst werden. Insbesondere in den Bereichen:
 - a) Datenschutz
 - b) Digitale Messwerterfassung auf Haushaltsebene
 - c) Nutzung von weiteren Datenquellen für den Netzbetrieb
 - d) Cyber-Sicherheit Aspekte und technische Richtlinien.
- 3) Zusätzlich sollten Anreize für Endverbraucher:innen zum Erwerb und zur Einrichtung von steuerbaren Geräten geschaffen werden, die das Erzeugungs- und Lastmanagement ermöglichen.

These 12:

Die rechtzeitige Umsetzung der Energiewende kann nur durch eine vollständige Digitalisierung von Planungs- und Genehmigungsprozessen gelingen

Kurzerläuterung

Die Anzahl von Netzanschlussgesuchen hat in den letzten Jahren drastisch zugenommen. Dieser Trend führt aktuell dazu, dass bereits einzelne Softwareunternehmen und Start-Ups [172] digitalisierte Lösungen zur (halb-) automatisierten Anschlussgesuchbearbeitung bereitstellen. Dies führt nach wie vor zu Handarbeit und individueller Kommunikation beim Netzbetreiber. Bei der großen Anzahl ist eine Automatisierung in Verbindung mit der Digitalisierung unumgänglich, was auch zu einem Abbau von Bürokratie führen sollte.

Auf der anderen Seite werden die Aufgaben für die Netzplanung durch die Vielzahl dezentraler Energieanlagen immer komplexer. Planung und Planungsverständnis muss daher dem komplexen Energiesystem gerecht werden. Das heißt, die Planungstools müssen in der Lage sein, signifikant komplexere Aufgaben mit mehr Parametern zu lösen, um den menschlichen Netzplaner zu entlasten. Am Schluss müssen die Ausbaubedarfe als Ergebnis der Anschlussgesuche und der Anschlusspotenziale automatisch identifiziert werden. Potenziell kann mit einem durchgehend digitalisierten Prozess die Bearbeitungszeit eines Anschlussgesuches von derzeit üblicherweise mehreren Wochen auf wenige Minuten reduziert werden.

Bedeutung für Schlüsselakteure der Energiewirtschaft

Für die meisten Netzbetreiber sollte eine manuelle (Ziel-)Netzplanung nicht mehr nötig sein, sondern zukünftig durch die Automatisierung der verschiedenen Prozesse (Anschlussgesuche, Genehmigungsverfahren etc.) fließend entstehen.

In den kommunalen Verwaltungen müssen Behördendaten digitalisiert werden und für die Planung zur Verfügung stehen. Das heißt gemeinsame Entwicklungspläne aller beteiligten Akteure (demografische Entwicklungen, Einkommensstrukturen, E-Kfz, etc.) müssen in einem automatisierten Genehmigungsprozess vernetzt sein.

Sollten sich die Netzbetreiber nicht rechtzeitig digital aufstellen und die digitale Netzplanung selbst realisieren können, werden neue Anbieter aus dem digitalen Umfeld diese relevanten Aufgaben übernehmen. Diese können die Aufgaben (kosten-) effizienter durchführen (siehe These 10).

Zentrale Botschaften an politische Akteur:innen

Zur Vermeidung von Planungsstaus oder -engpässen bei der Bearbeitung von Anschlussgesuchen und in der Umsetzung der Maßnahmen müssen bisherige bürokratische Prozesse deutlich beschleunigt werden, um einen effizienten und effektiven Netzausbau zu gewährleisten. Anreize zur Digitalisierung und Automatisierung müssen grundlegend gestärkt werden. Ein Informationsaustausch aus der demografischen und baulichen Stadt-/Landplanung und -entwicklung zwischen den Ländern und Kommunen und den jeweiligen Netzbetreibern ist sinnvoll für Netzausbauplanungen und muss in die Energieversorgung integriert werden.

Zentrale Handlungsempfehlungen

- 1) Eine übergreifende Datengrundlage für Behörden/Kommunen und Netzbetreiber/-planer sollte geschaffen werden, um die jeweiligen Zukunftsplanungen besser aufeinander abzustimmen.
- 2) Es müssen Voraussetzungen sowie Anreize geschaffen werden, sodass bürokratische Prozesse automatisiert und somit beschleunigt werden können. Hier sollte insbesondere §14e EnWG berücksichtigt werden.
- 3) Zur schnellen Abstimmung von politischen Weichenstellungen mit den Branchenakteuren ist die Durchführung von Initiativen wie »Genehmigungsverfahren digital denken« sehr empfehlenswert, weshalb diese ausgeweitet werden sollten.

5.5 Schwerpunkt Cybersecurity

Die Digitalisierung und die Dezentralisierung der Energiesystems geht einher mit einer steigenden Anzahl an informations- und kommunikationstechnischen Systemen und Komponenten in der Energieversorgungsinfrastruktur. Dies erhöht zwangsläufig die Angriffsfläche für Cyberbedrohungen und die Menge und Komplexität an potenziellen Angriffsvektoren auf die IT- und OT-Infrastrukturen des Energiesystems. Auf Grund der immensen Bedeutung der Energieversorgung als kritische Infrastruktur für Wirtschaft und Gesellschaft, ist das Energiesystem ein zunehmend attraktives Ziel im Kontext von Wirtschaftskriminalität aber auch von politisch motivierten Cyberangriffen durch staatlich finanzierte Akteure. Die Komplexität derartiger Angriffe wird dabei immer weiter ansteigen und eine Neuausrichtung der Gefahrenabwehr von Cyberangriffen erfordern. Koordinierte Angriffe, wie »Advanced Persistent Threats« (APT), sind mehrstufige Vorgehensweisen mit Anwesenheiten der Angreifer:innen im Netzwerk über einen längeren Zeitraum bis zur Zielerreichung. Derartige Angriffsmethoden erfordern somit neue Vorgehensweisen und Ausrichtungen im Bereich der Cybersicherheit des Energiesystems. Dabei wird es in erster Linie notwendig werden, die Robustheit der IT- und OT-Infrastrukturen gegenüber Angriffen zu erhöhen. Dies ist zum einen die Schaffung einer Cyberresilienz durch geeignete Methoden und Verfahren und zum anderen die strukturelle Redundanz, vor allem bezüglich der notwendigen Kommunikation im Energiesystem.

These 13: Cyberresilienz wird Cybersecurity ablösen

Kurzerläuterung

Bei der Cyberresilienz wird davon ausgegangen, dass eine vollständige Absicherung von Information Technology (IT-) und Operational Technology (OT-)Infrastrukturen gegen Cyberangriffe nicht möglich sein wird und fortgeschrittene Angreifer:innen jegliche Cybersicherheitsmaßnahmen umgehen oder eine langfristige Präsenz in Systemen aufrechterhalten können. Daher muss sichergestellt werden, dass kritische Funktionen trotz Störungen durch ungünstige Bedingungen, einschließlich Cyberangriffen, betriebsbereit bleiben (s. NIST SP 800-160v2). Cyberresilienz basiert heute auf einem Kreis von fünf Funktionen (NIST, »The Five Functions«): 1) Identifikation von Risiken und Gefahren, 2) Umsetzung von Schutzmechanismen, 3) Erkennung von Angriffen und Ausfällen, 4) Behandlung von Vorfällen und 5) Wiederherstellung von Systemen oder Komponenten (NIST TN2051).

Damit ergänzt der Design-Ansatz für Resilienz den der Sicherheit, indem er zusätzlich die Angriffserkennung, Reaktion und Behebung ergänzt. Getrieben ist der Gedanke vor allem dadurch, dass Sicherheitsmechanismen fehlschlagen, Systeme angegriffen werden und trotzdem in Betrieb bleiben müssen, oder ihren Betrieb möglichst schnell wiederaufnehmen müssen.

Bedeutung für Schlüsselakteure der Energiewirtschaft

Um die kritischen Energieinfrastrukturen cyberresilient zu machen, bedarf es einer fundamentalen Kenntnis der eigenen IT-/OT-Infrastruktur bei Energieversorgern und Netzbetreibern. Dazu gehören die grundlegenden Bewertungen der Risiken und Gefahren von Cyberangriffen und eine Beurteilung der Vulnerabilitäten von Assets sowie der Auswirkungen von Ausfällen von IT-/OT-Netzwerken und -Komponenten auf den elektrischen Versorgungsprozess.

Für die Erkennung von Angriffen sind Systeme und Prozesse zu etablieren, die eine konkrete und effiziente Detektion von Anomalien und des Eindringens von Angreifer:innen in die IT-/OT-Systeme ermöglichen. IDS-Systeme, die zukünftig gesetzlich vorgeschrieben sind, und SIEM-Systeme können hierfür die Basis bilden. Aufgrund der aktuellen Heterogenität und der Besonderheit der Kommunikationssysteme stellt dies eine spezielle Herausforderung für die OT-Infrastrukturen dar. Hier ist vor allem eine tiefgehende Kenntnis der Infrastrukturen und der Kommunikationsprotokolle notwendig.

Um den sicheren Betrieb und die Aufrechterhaltung primärer Aufgaben der Energieversorgung zu gewährleisten, während erkannte oder unerkannte Cyberangriffe stattfinden, ist eine robuste und teilautarke Funktionsfähigkeit der Systeme und Komponenten zu implementieren. Dazu zählt auch die Herstellung der Reaktionsfähigkeit bei erkannten Angriffen über entsprechende Maßnahmenpläne und Notfallsysteme.

Für die Wiederherstellung von angegriffenen Komponenten und Systemen sind Prozesse und Tools zu etablieren, die es ermöglichen, schnell einen vertrauenswürdigen Zustand herzustellen, um die betroffenen Systeme wieder in Betrieb nehmen zu können.

Zentrale Botschaften an politische Akteur:innen

Der Paradigmenwechsel von der reinen Betrachtung von Cybersicherheit und hin zu Cyber-resilienten Energieinfrastrukturen muss hinsichtlich der gesetzlichen Vorgaben und Richtlinien entsprechend begleitet werden. Hier müssen neueste Erkenntnisse aus der Sicherheits- und Resilienzforschung in verbindliche Vorgaben einfließen. Gleichzeitig sind vorhandene behördliche Strukturen zur Erfassung und dem Management von Vorfällen weiterzuentwickeln und so auszugestalten, dass alle Phasen des Cyberresilienz-Modells adäquat betrachtet werden. Dies umfasst z. B. die Vorbereitung der Unternehmen auf Angriffssituationen z. B. durch Testszenarien oder koordinierte Stresstests im Verbund mit Akteuren des Energiemarktes.

Zentrale Handlungsempfehlungen

Wir brauchen in den kommenden Jahren einen starken Fokus in der Industrie und Forschung auf langfristige, zuverlässige Strategien, um mit erfolgreichen Angriffen umzugehen, deren Effekte auf die Betriebssicherheit einzudämmen und eventuelle Schäden zu beseitigen. Die betroffenen Unternehmen brauchen dazu sowohl klare Richtlinien als auch Ansprechpartner für die Beratung und Umsetzung ganzheitlicher Security-Konzepte zur Steigerung der Cyberresilienz in ihren IT- und OT-Infrastrukturen.

Ein weiterer Schwerpunkt muss in der Aus- und Weiterbildung des Personals von Energieversorgungsunternehmen liegen. Beginnend bei der Schaffung des notwendigen Bewusstseins, ist das notwendige Wissen zur Absicherung von Infrastrukturen sowie eine Cyberresilienz von Energieinfrastrukturen zu etablieren.

These 14: Zuverlässige Energieinfrastrukturen benötigen zuverlässige Kommunikationsnetze

Kurzerläuterung

Die Betriebsführung unserer Energieversorgungsnetze wird immer stärker von einer verlässlichen Kommunikationsinfrastruktur abhängig. Kommunikationskanäle sind in der Anlagen- und Systemsteuerung bei der Integration von erneuerbaren Energien bereits unverzichtbar und sind Grundvoraussetzung für die effiziente Betriebsführung unserer Energieversorgungsnetze. Mit der wachsenden Anzahl von Produzent:innen und Konsument:innen im System werden Kommunikationskanäle jedoch essenziell für die Aufrechterhaltung des Betriebs werden.

Die Kommunikationsnetze werden somit immer mehr zu einem integralen Bestandteil der Energieinfrastruktur. Paradigmen der sicheren und zuverlässigen Energieversorgung, wie z. B. das N-1 Prinzip müssen zukünftig auch bei der Planung und dem Betrieb der notwendigen Kommunikationsinfrastrukturen Berücksichtigung finden. Dabei werden verschiedene Kommunikationstechnologien (z. B. 450 Megahertz als Backup) zum Einsatz kommen.

Bedeutung für Schlüsselakteure der Energiewirtschaft

Für die kommunikationstechnische Ankopplung dezentraler Anlagen müssen effiziente Möglichkeiten geschaffen werden, um eine sichere Datenübertragung und Integration in die Betriebsführung zu realisieren. Zukünftig werden zudem auch mehr Informationen aus heterogenen Datenquellen aus den Netzen zur Verfügung stehen und über verschiedene Kommunikationswege und -technologien übertragen werden. Beispiele hierfür sind IIoT-Datenkanäle über LoRaWAN-Kommunikation. Dies erfordert eine sichere, verschlüsselte und manipulationsfreie Übertragung auch über öffentliche Kommunikationsnetze. Die Kommunikationsstrecken müssen dabei in ein umfassendes Monitoring integriert werden, um die Erkennung von Manipulationen und Störungen gewährleisten zu können.

Für die Betriebsführung der Energieversorgungssysteme sind Sicherheits-Paradigmen wie das N-1 Prinzip auch auf die Kommunikationsstrecken als integraler Bestandteil der Versorgungsinfrastruktur anzuwenden. Dies bedeutet den Aufbau von zusätzlichen Kommunikationsstrukturen, die im Bedarfsfall die Datenübertragung übernehmen. Die 450 Megahertz Funkübertragung, die von den Netzbetreibern im Hinblick auf die Schwarzstartfähigkeit etabliert wird, kann hier ein wichtiger Baustein sein. Es muss in dem Zusammenhang sichergestellt werden, dass eine möglichst umfassende Abdeckung, auch für z. B. kleinere, dezentrale Netze, erfolgt. Bei der Konzeption und Planung derartiger Backup-Netze ist auf eine Skalierbarkeit in der Übertragungsbandbreite und der Anzahl der Teilnehmenden zu achten.

Zentrale Botschaften an politische Akteur:innen

Um die Kommunikationsnetze entsprechend weiterzuentwickeln und auch redundante Strukturen aufzubauen, ist Planungssicherheit für die Netzbetreiber und Energieversorger eine Grundvoraussetzung. Hierfür sind einerseits Fragen der Investitionsmöglichkeiten in solche redundanten Strukturen zu klären und rechtsverbindlich zu gestalten. Zum anderen bedarf es einer kontinuierlichen Weiterentwicklung der gesetzlichen Vorgaben für die Kommunikationssicherheit auch für neue Technologien und Übertragungsstrecken. Dies umfasst Maßnahmen zum Schutz der Kommunika-

tion und muss die Endpunkte und Ende-zu-Ende-Sicherheit mit beachten. Zudem sind diese Kommunikationsstrecken in den Vorgaben zum Monitoring und der Anomalie- und Angriffserkennung zu berücksichtigen.

Zentrale Handlungsempfehlungen

Die Kommunikationsinfrastrukturen müssen als integraler Bestandteil der kritischen Infrastrukturen der Energieversorgung betrachtet werden. Paradigmen wie die N-1-Sicherheit sind auch auf diesen Bereich anzuwenden. Dazu müssen verschiedene, optimal für den jeweiligen Einsatzfall geeignete Technologien zum Einsatz kommen, die eine Backup-Lösung darstellen.

Der Ausbau einer redundanten Kommunikationsinfrastruktur muss als notwendige Investition in eine sichere und zuverlässige Energieversorgung verstanden werden und entsprechend vorgegeben bzw. angereizt werden.

Durch die Einbeziehung der verschiedenen Kommunikationstechnologien in die grundlegenden Normen und Standards müssen Systemhersteller in der Entwicklung von entsprechenden Lösungen und Produkten bestärkt werden.

5.6 Europäische Dimension

Die Autor:innen möchten abschließend hervorheben, dass die Bereitstellung von Energie bereits heute vielfach im europäischen Zusammenspiel funktioniert. In der Zukunft wird dem Austausch von Energie und Flexibilitäten über inner- und außereuropäische Grenzen hinweg eine noch stärkere Rolle zukommen (siehe bspw. Langfristszenarien [169]). Besonders deutlich wird dies bereits heute an der aktuellen Energiekrise, die ausschließlich durch eine gemeinsame europäische Antwort lösbar ist [173].

Doch die EU-Harmonisierung des Europäischen Energiesystems wirkt sich nicht nur auf Regulierung oder tatsächliche Energieflüsse aus, sondern auch auf die zugehörige IKT-Domäne. Wenn z. B. die neuen IT-Plattformen »Manually Activated Reserves Initiative« (MARI) oder »Platform for the International Coordination of Automated Frequency Restoration and Stable System Operation« (PICASSO) europaweite Ausschreibungen von Regelreserve ermöglichen, ergeben sich Chancen standardisierungsbedingter Prozessvereinfachungen und wettbewerbsbedingter Kostenreduktionen auf großskaliger Ebene. Dies ist nur eines von zahlreichen Beispielen, in denen europäische Lösungen und die Entwicklung gemeinsamer Plattformen und Systeme erfolgreicher sind als nationale Lösungen. Mit einem europaweit vernetzten Energiesystem sollten auch einheitliche IT-Standards und gemeinschaftlich genutzte Lösungen einhergehen, um eine erfolgreiche gesamt-europäische Energiewende voranzutreiben [174, 175].

6 Fazit

Die Studie fokussiert sich auf fünf Schwerpunktthemen im Bereich des Energiesystems, in denen in der kurz- bis mittelfristigen Perspektive (Zeithorizont bis 2030) drängender Handlungsbedarf in Bezug auf die Digitalisierung besteht. Aus Sicht der Autor:innen sind die relevantesten Themenfelder für eine Digitalisierung der Energiewirtschaft in den Bereichen Datenökonomie, Sektorenkopplung, Anlagenkommunikation, Cybersicherheit und dem digitalisierten Betrieb der Netze zu finden. Diese Themenfelder wurden auf Basis einer Analyse der aktuellen Trends der energiewirtschaftlichen Entwicklungen sowie von aktuellen Trends der Digitalisierung als zentrale Schwerpunktthemen herausgearbeitet und mit Expert:innen aus Wirtschaft und Forschung verifiziert. Bezugnehmend auf den aktuellen Stand der Digitalisierung in diesen Themenbereichen sowie den Potenzialen sind in Summe 14 Thesen entwickelt worden, die einen Beitrag zur Diskussion und einen Impuls für die kommenden Jahre liefern sollen. Dazu wurde für jede These die Bedeutung für einzelne Schlüsselakteure herausgestellt sowie konkretere Handlungsempfehlungen abgeleitet. Die Handlungsempfehlungen richten sich sowohl an die verschiedenen energiewirtschaftlichen Akteure wie auch an politische Entscheidungsträger:innen, sodass sie einen Widerhall in der Breite der kommenden Entscheidungsprozesse erfahren können.

Als notwendiger Bestandteil einer digitalisierten Energiewirtschaft ist eine datenzentrierte Betrachtung zukünftig besonders wichtig. Dazu müssen zunächst vor allem mehr Daten erhoben werden und anschließend, insbesondere möglichst kostengünstig, übertragbar sein. Dies betrifft einerseits die Anlagenkommunikation, die immer noch einen relevanten Teil der Kosten von Digitalisierungsprojekten ausmacht. Durch die Nutzung vorhandener Datenkanäle, offener Schnittstellen zum interoperablen Datenaustausch, als auch eine weitreichende Automatisierung im Kommunikationsaufbau (»Plug & Play«) können Aufwände für die Anlagenkommunikation drastisch reduziert werden und somit datenbasierte Geschäftsmodelle wesentlich schneller in die Rentabilität kommen. Hierbei ist es wichtig, dass die vielen Akteure der Energiewirtschaft zusammenarbeiten und datengetriebene Wertschöpfungsnetzwerke bilden. Eine gemeinsame Datenökonomie schafft dabei Werte für alle Beteiligten und ermöglicht die Nutzung von modernen KI-basierten Methoden auf einer großen Datenbasis, über die einzelne Akteure i. d. R. nicht verfügen. Die daraus gewonnenen Informationen ermöglichen eine ökologische und ökonomische Optimierung des Energiesystems.

Insbesondere der Netzbetrieb als regulierter Teil der Energiewirtschaft steht vor besonderen Herausforderungen. Die aktuelle Anreizregulierung ist bisher nicht im notwendigen Maße auf die Digitalisierung als Kernbaustein (neben dem dringend notwendigen Netzausbau) ausgerichtet. Folglich ist das klassische Assetgeschäft der Netzbetreiber auf langfristige Investitionen ausgerichtet und damit traditionell eher auf standardisierte und erprobte Technologien fokussiert. Die Digitalisierung mit ihren wesentlich schnelleren Entwicklungszyklen steht dabei oft in einem erheblichen Spannungsfeld. Der Netzbetrieb muss dennoch vor allem in den unteren Netzebenen weitreichend digitalisiert werden, um den neuen Anforderungen gerecht zu werden. Damit wird Digitalisierung zu einer neuen Kernkompetenz des Netzbetriebs. Das betrifft neben den operativen Prozessen auch die zeitkritischen Planungs- und Genehmigungsprozesse. Hier sind insbesondere auch die BNetzA, das BMWK und weitere regulatorische Akteure gefragt, für diese Prozesse adäquate Schnittstellen bereit zu stellen.

Energiewirtschaft ist nicht ausschließlich die Stromwirtschaft. Daher muss insbesondere an den Schnittstellen zu anderen Sektoren, sowie auch innerhalb der anderen Sektoren, die Digitalisierung eine tragende Rolle einnehmen. Eine effiziente Sektorenkopplung benötigt eine sektorenübergreifende Betrachtung von Prozessen und einen Austausch von damit verbundenen Daten.

Forschungsprojekte zeigen hier auf der einen Seite, dass durch Interoperabilität und Steuerbarkeit erneuerbare Energien effizienter integriert werden können, gleichzeitig jedoch Anreize fehlen bzw. regulatorische Hürden bestehen, um z. B. auf Quartiersebene Konzepte zur Kopplung von lokaler Erzeugung, mit CO₂-freier Wärmeversorgung in Wärmenetzen zu ermöglichen. Hier wären bereits heute mit einer überarbeiteten Regulatorik sinnvolle sektorenübergreifende Geschäftsmodelle möglich. Insbesondere der Wärmebereich zeigt hinsichtlich der Digitalisierung ein großer Nachholbedarf. Sowohl im Bereich der Fernwärme als auch in der Optimierung von Liegenschaften bestehen signifikante Potenziale, die mithilfe von vernetzten, erneuerbaren Wärmekonzepten zu heben sind.

Das Energiesystem stellt eine kritische Infrastruktur dar, sodass den Themen Energieversorgungssicherheit und Cybersecurity eine besondere Bedeutung zukommt. Datennetzen muss ein vergleichbarer Stellenwert als kritische Infrastruktur wie Energieversorgungsnetzen beigemessen werden. Zusätzlich zur klassischen Cybersecurity wird zukünftig der Ansatz der Cyberresilienz an Relevanz gewinnen. Bei einer Vielzahl an möglichen Angriffen kann nicht davon ausgegangen werden, dass ein System vor allen Ausfällen und Manipulationen geschützt ist. Es müssen folglich Systeme geschaffen werden, die resilient mit Angriffen und Störungen umgehen können.

Zusammenfassend sehen die Autor:innen die Digitalisierung als integralen Schlüsselprozess zur Umsetzung der Energiewende. Eine rechtzeitige und ökonomisch tragfähige Transformation der gesamten Energieversorgung ist nur durch konsequente Digitalisierung der gesamten Wertschöpfung möglich. Als Konsequenz daraus ergibt sich, dass Verzögerungen in der Digitalisierung auch zu Verzögerung der gesamten Energiewende führen. Diese Abhängigkeit muss insbesondere in der kommenden Phase der Systemtransformation berücksichtigt werden, damit die Dekarbonisierung aller Sektoren rechtzeitig gelingen kann. Wichtig ist hierfür, dass die Digitalisierungskompetenz innerhalb der ganzen Branche in den nächsten Jahren erheblich gestärkt wird und Energieunternehmen sowie Behörden Digitalisierung als notwendige Kernkompetenz wahrnehmen. Trotz der Notwendigkeit sind nicht alle Technologien, die der IT-Sektor hervorbringt, im Energiesystem relevant. Digitalisierung ist und bleibt ein wichtiges Werkzeug und verfolgt keinen Selbstzweck. Daher ist ein Abgleich der technologischen Möglichkeiten und der energiewirtschaftlichen Notwendigkeiten in jedem Schritt erforderlich.

7 **Abbildungsverzeichnis**

Abbildung 1:	Stromerzeugung in Deutschland in 2030 und 2050 nach Energieträgern.....	11
Abbildung 2:	Transformation Industriesektor nach Energieträgern und Endenergiebedarf in Deutschland bis 2050	12
Abbildung 3:	Szenarien für Transformation des Energiebedarfs im Verkehr bis 2050.....	14
Abbildung 4:	Szenarien für Transformation des Energiebedarfs in der Gebäude-Wärme bis 2050	16
Abbildung 5:	Ausbau des Übertragungsnetzes und der grenzüberschreitenden Kuppelstellen bis 2050	18

8 Literaturverzeichnis

- [1] European Commission. "Powering a climate-neutral economy: An EU Strategy for Energy System Integration." COM(2020) 299. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/ALL/?uri=COM:2020:299:FIN>
- [2] United Nations Climate Change, Hg., "The Paris Agreement," Zugriff am: 20. September 2022. [Online]. Verfügbar unter: https://unfccc.int/sites/default/files/english_paris_agreement.pdf
- [3] Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK). "Überblickspapier Osterpaket." https://www.bmwk.de/Redaktion/DE/Downloads/Energie/0406_ueberblickspapier_osterpaket.html (Zugriff am: 23-09.2022).
- [4] European Commission. "REPowerEU Plan, COM(2022) 230 final." <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=COM%3A2022%3A230%3AFIN&qid=1653033742483> (Zugriff am: 23. Sep. 2022).
- [5] Elia Group, Hg., "Towards a consumer-centric and sustainable electricity system: A white paper on a consumer-centric market design to unleash competition behind the meter," Jun. 2021. [Online]. Verfügbar unter: https://www.eliagroup.eu/-/media/project/elia/shared/documents/elia-group/publications/studies-and-reports/20210618_elia_ccmd-white-paper_en.pdf
- [6] ENTSO-E, Hg., "Electric Vehicle Integration into Power Grids," Mrz. 2021. Zugriff am: 20. September 2022. [Online]. Verfügbar unter: https://eepublicdownloads.entsoe.eu/clean-documents/Publications/Position%20papers%20and%20reports/210331_Electric_Vehicles_integration.pdf
- [7] Bundesministerium für Digitales und Verkehr (BMVI), *Masterplan Ladeinfrastruktur II der Bundesregierung auf der Zielgeraden*, 2022. Zugriff am: 19. September 2022. [Online]. Verfügbar unter: https://www.bmvi.de/SharedDocs/DE/Anlage/K/presse/pm-048-anlage.pdf?__blob=publicationFile
- [8] Greenflux. "Smartest in EV charging solutions." <https://www.greenflux.com/> (Zugriff am: 20. Sep. 2022).
- [9] E. Brunken *et al.*, "Systemsicherheit 2050: Systemdienstleistungen und Aspekte der Stabilität im zukünftigen Stromsystem," Apr. 2020. [Online]. Verfügbar unter: https://www.dena.de/fileadmin/dena/Publikationen/PDFs/2020/dena_Systemsicherheit_2050_LANG_WEB.pdf
- [10] H. Seidl *et al.*, "Dena-Netzfex-Studie: Optimierter Einsatz von Speichern für Netz und Marktanwendungen in der Stromversorgung," Berlin, Mrz. 2017. Zugriff am: 19. September 2022. [Online]. Verfügbar unter: https://www.dena.de/fileadmin/dena/Dokumente/Pdf/9191_dena_Netzflexstudie.pdf
- [11] M. Antretter *et al.*, "Digitalisation of Energy Flexibility," Mai. 2022, doi: 10.2833/113770. Zugriff am: 19. September 2022. [Online]. Verfügbar unter: <https://op.europa.eu/de/publication-detail/-/publication/c230dd32-a5a2-11ec-83e1-01aa75ed71a1/language-en>
- [12] TenneT TSO GmbH. "Innovationen in der Systemführung bis 2030." <https://www.inno-sys2030.de/>
- [13] O. D. Doleski, Hg. *Herausforderung Utility 4.0: Wie sich die Energiewirtschaft im Zeitalter der Digitalisierung verändert*. Wiesbaden, Heidelberg: Springer Vieweg, 2017.

- [14] T. Meister, "Kooperative Energiewende: Die Bedeutung von lokalen Governance-Strukturen für Energiegenossenschaften in Deutschland," Dissertation, Mathematisch-Naturwissenschaftlichen Fakultät, Rheinischen Friedrich-Wilhelms-Universität Bonn, Bonn, 2021. [Online]. Verfügbar unter: <https://bonndoc.ulb.uni-bonn.de/xmlui/handle/20.500.11811/9320>
- [15] J. Bergner, R. Hoelger und B. Praetorius, "Nutzung von Steckersolargeräten 2022: Ergebnisse einer Umfrage zu kleinsten Photovoltaik-Geräten," Fachbereich 3 – Wirtschaftswissenschaften, Berlin, Technisches Arbeitspapier (TAP) 3 - Version 1.0, Mai. 2022. [Online]. Verfügbar unter: <https://solar.htw-berlin.de/wp-content/uploads/BERGNER-2022-Nutzungs-Studie-Steckersolar.pdf>
- [16] K. Treichel, M. Blum und M. Kowarsch, "Bürgersichten auf zukünftige Energiewelten: Ergebnisse der Ariadne-Bürgerkonferenz," Potsdam, Kopernikus-Projekt Ariadne - Ariadne Report, Jul. 2022. [Online]. Verfügbar unter: https://ariadneprojekt.de/media/2022/07/Ariadne-Report_Buergerkonferenz-Energiewende_Juli2022.pdf
- [17] EY, "Barometer – Digitalisierung der Energiewende: Digitalisierung 2020," 2021.
- [18] L. Kratochwill, P. Richard, L. Babilon und e. al, *dena-Analyse. Künstliche Intelligenz - vom Hype zur energiewirtschaftlichen Realität*. Berlin: Deutsche Energie-Agentur.
- [19] T. Almomani, S. Englberger, A. Jossen und R. Witzmann, "Aggregating Residential Energy Storages and Electric Vehicles Through Peer-To-Peer Local Energy Markets in Low Voltage Distribution Grids," in *NEIS 2021: Conference on Sustainable Energy Supply and Energy Storage Systems : 13-14 Sept. 2021*, 2021. [Online]. Verfügbar unter: <https://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=9698268>
- [20] D. Peper, S. Längle, M. Muhr, T. Reuther und C. Kost, "Photovoltaik- und Batteriespeicherzubaue in Deutschland in Zahlen: Auswertung des Marktstammdatenregisters," Freiburg, Aug. 2022. [Online]. Verfügbar unter: https://www.ise.fraunhofer.de/content/dam/ise/de/documents/presseinformationen/2022/Kurzpapier_Strukturelle_Entwicklungen_V14.pdf
- [21] M. Antretter *et al.* "Digitalisation of energy flexibility." <https://data.europa.eu/doi/10.2833/113770>
- [22] E. Dörre, S. Pfaffel, A. Dreher, P. Girón, S. Heising und K. Wiedemann, "Flexibility Reserve of Self-Consumption Optimized Energy Systems in the Household Sector," *Energies*, Jg. 14, Nr. 11, S. 3017, 2021, doi: 10.3390/en14113017.
- [23] B. Faessler, "Stationary, Second Use Battery Energy Storage Systems and Their Applications: A Research Review," *Energies*, Jg. 14, Nr. 8, S. 2335, 2021, doi: 10.3390/en14082335.
- [24] G. Mor *et al.*, "Operation and energy flexibility evaluation of direct load controlled buildings equipped with heat pumps," *Energy and Buildings*, Jg. 253, S. 111484, 2021. doi: 10.1016/j.enbuild.2021.111484. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378778821007684>
- [25] A. C. Mulkern. "California Faces Summer Blackouts from Climate Extremes." <https://www.scientificamerican.com/article/california-faces-summer-blackouts-from-climate-extremes/> (Zugriff am: 19. Sep. 2022).
- [26] Bundesumweltministeriums. "Green IT." <https://www.bmuv.de/themen/nachhaltigkeit-digitalisierung/konsum-und-produkte/produktbereiche/green-it> (Zugriff am: 31. Aug. 2022).
- [27] Murugesan San, "Harnessing Green IT: Principles and Practices," *IT Professional*, Jg. 10, Nr. 1, S. 24–33, 2008, doi: 10.1109/MITP.2008.10.
- [28] G. Carvalho und E. Kazim, "Themes in data strategy: thematic analysis of 'A European Strategy for Data' (EC)," *AI Ethics*, Jg. 2, Nr. 1, S. 53–63, 2022, doi: 10.1007/s43681-021-00102-y.

- [29] B. Otto, "GAIA-X and IDS," 2021, doi: 10.5281/zenodo.5675897.
- [30] GitHub. "International Data Spaces Association." <https://github.com/International-Data-Spaces-Association/> (Zugriff am: 31. Aug. 2022).
- [31] A. Weis *et al.* "GXFS-DE." <https://www.gxfs.eu/de/gxfs-de/> (Zugriff am: 19. Sep. 2022).
- [32] Robert Koch-Institut. "So funktioniert die Corona-Warn-App im Detail." https://www.rki.de/DE/Content/InfAZ/N/Neuartiges_Coronavirus/WarnApp/Funktion_Detail.pdf?__blob=publicationFile (Zugriff am: 19. Sep. 2022).
- [33] H.-A. Krebs und P. Hagenweiler, *Innovationen und künstliche Intelligenz entlang der energie-wirtschaftlichen Wertschöpfungskette unter Berücksichtigung der Datensicherheit und des Datenschutzes*. Kassel, 2021.
- [34] Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK), Hg., "Digitalisierung der Wirtschaft in Deutschland," Berlin, Jan. 2022. Zugriff am: 19. September 2022. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.bmwk.de/Redaktion/DE/Publikationen/Digitalisierungsindex/publikation-download-Langfassung-digitalisierungsindex-2021.pdf>
- [35] V. Brühl, "Bitcoins, Blockchain und Distributed Ledgers," *Wirtschaftsdienst*, Jg. 97, Nr. 2, S. 135–142, 2017, doi: 10.1007/s10273-017-2096-3.
- [36] J. Sedlmeir, H. U. Buhl, G. Fridgen und R. Keller, "Ein Blick auf aktuelle Entwicklungen bei Blockchains und deren Auswirkungen auf den Energieverbrauch," *Informatik Spektrum*, Jg. 43, Nr. 6, S. 391–404, 2020, doi: 10.1007/s00287-020-01321-z.
- [37] M. A. Nielsen und I. L. Chuang, *Quantum Computation and Quantum Information*. Cambridge University Press, 2012.
- [38] A. W. Cross, L. S. Bishop, S. Sheldon, P. D. Nation und J. M. Gambetta, "Validating quantum computers using randomized model circuits," 2018. doi: 10.48550/arXiv.1811.12926. [Online]. Verfügbar unter: <https://arxiv.org/pdf/1811.12926>
- [39] K. Rolston-Duce. "Demonstrating Benefits of Quantum Upgradable Design Strategy: System Model H1-2 First to Prove 2,048 Quantum Volume." <https://www.quantinuum.com/pressrelease/demonstrating-benefits-of-quantum-upgradable-design-strategy-system-model-h1-2-first-to-prove-2-048-quantum-volume> (Zugriff am: 19. Sep. 2022).
- [40] S. Endo, Z. Cai, S. C. Benjamin und X. Yuan, "Hybrid Quantum-Classical Algorithms and Quantum Error Mitigation," *J. Phys. Soc. Jpn.*, Jg. 90, Nr. 3, S. 32001, 2021, doi: 10.7566/JPSJ.90.032001.
- [41] C. Dalyac *et al.*, "Qualifying quantum approaches for hard industrial optimization problems. A case study in the field of smart-charging of electric vehicles," *EPJ quantum technology*, Early Access. doi: 10.1140/epjqt/s40507-021-00100-3.
- [42] A. Luckow, J. Klepsch und J. Pichlmeier, "Quantum Computing: Towards Industry Reference Problems," 2021, doi: 10.48550/arXiv.2103.07433.
- [43] C. Berger *et al.*, "Quantum technologies for climate change: Preliminary assessment," 2021, doi: 10.48550/arXiv.2107.05362.
- [44] Oxford University Press. "Oxford Reference: artificial intelligence." <https://www.oxfordreference.com/view/10.1093/oi/authority.20110803095426960> (Zugriff am: 19. Sep. 2022).
- [45] L. Vogel, M. Klobasa, S. Pelka und P. Plötz. "Künstliche Intelligenz für die integrierte Energiewende." https://www.dena.de/fileadmin/dena/Publikationen/PDFs/2019/dena-ANALYSE_Kuenstliche_Intelligenz_fuer_die_integrierte_Energiewende.pdf (Zugriff am: 9. Nov. 2019).

- [46] BDEW Bundesverband der Energie- und Wasserwirtschaft. "Künstliche Intelligenz für die Energiewirtschaft." https://www.bdew.de/media/documents/BDEW_KI_LAUNCH_2406_1ADI-AzP.pdf (Zugriff am: 19. Sep. 2022).
- [47] L. Richter *et al.*, "Artificial Intelligence for Electricity Supply Chain automation," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Jg. 163, S. 112459, 2022, doi: 10.1016/j.rser.2022.112459.
- [48] Bundesnetzagentur für Elektrizität, Gas, Telekommunikation, Post und Eisenbahnen, *Bundesnetzagentur veröffentlicht Netzabdeckung mit 5G*. Bonn, 2021. [Online]. Verfügbar unter: https://www.bundesnetzagentur.de/SharedDocs/Pressemitteilungen/DE/2021/20211209_5GMonitoring.html
- [49] V. Stich, J. Hicking, M.-F. Stroh, M. Abbas, S. Kremer und L. Henke, "Digitalisierung der Wirtschaft in Deutschland: Technologie- und Trendradar 2021," Berlin, Studie im Rahmen des Projekts „Entwicklung und Messung der Digitalisierung der Wirtschaft am Standort Deutschland“ im Auftrag des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie, Okt. 2021. [Online]. Verfügbar unter: https://www.de.digital/DIGITAL/Redaktion/DE/Digitalisierungsindex/Publicationen/publikation-download-technologie-trendradar-2021.pdf?__blob=publicationFile&v=3
- [50] SpaceX. "Das fortschrittlichste Breitbandsatelliteninternet der Welt." <https://www.starlink.com/technology> (Zugriff am: 19. Sep. 2022).
- [51] N. Pachler, I. del Portillo, E. F. Crawley und B. G. Cameron, "An Updated Comparison of Four Low Earth Orbit Satellite Constellation Systems to Provide Global Broadband," in *2021 IEEE International Conference on Communications workshops (ICC workshops): Proceedings : virtual conference, 14-23 June 2021*, Montreal, QC, Canada, 2021, S. 1–7, doi: 10.1109/ICCWorkshops50388.2021.9473799.
- [52] N. S. Chilamkurthy, O. J. Pandey, A. Ghosh, L. R. Cenkeramaddi und H.-N. Dai, "Low-Power Wide-Area Networks: A Broad Overview of Its Different Aspects," *IEEE Access*, Jg. 10, S. 81926–81959, 2022, doi: 10.1109/ACCESS.2022.3196182.
- [53] 450connect. "Ausfallsichere Kommunikation für kritische Infrastrukturen." <https://www.450connect.de/> (Zugriff am: 19. Sep. 2022).
- [54] Bundesministerium der Justiz. "Datenschutzgrundverordnung." https://www.bmj.de/DE/Themen/FokusThemen/DSGVO/DSVG0_node.html (Zugriff am: 31. Aug. 2022).
- [55] "Deal on Digital Markets Act: ensuring fair competition and more choice for users | News | European Parliament." <https://www.europarl.europa.eu/news/en/press-room/20220315IPR25504/deal-on-digital-markets-act-ensuring-fair-competition-and-more-choice-for-users> (Zugriff am: 31. Aug. 2022).
- [56] Wirtschaft und Klimaschutz, Bundesministerium für. "Europäische Einigung auf Plattformgesetz – Gesetz für Digitale Dienste ist wichtiger Schritt zur Sicherung eines freien und demokratischen Internets." <https://www.bmwk.de/Redaktion/DE/Pressemitteilungen/2022/04/20220423-europaeische-einigung-auf-plattformgesetz.html> (Zugriff am: 31. Aug. 2022).
- [57] Gestaltung der digitalen Zukunft Europas. "Europäisches Daten-Governance-Gesetz." <https://digital-strategy.ec.europa.eu/de/policies/data-governance-act> (Zugriff am: 31. Aug. 2022).
- [58] European Commission, *Datengesetz: Maßnahmen für eine faire und innovative Datenwirtschaft*, 2022. [Online]. Verfügbar unter: https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/de/ip_22_1113

- [59] S. L. School. "EU Artificial Intelligence Act: The European Approach to AI | Stanford Law School." <https://law.stanford.edu/publications/eu-artificial-intelligence-act-the-european-approach-to-ai/> (Zugriff am: 31. Aug. 2022).
- [60] European Commission. "LAYING DOWN HARMONISED RULES ON ARTIFICIAL INTELLIGENCE (ARTIFICIAL INTELLIGENCE ACT) AND AMENDING CERTAIN UNION LEGISLATIVE ACTS." <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/HTML/?uri=CELEX:52021SC0084&from=EN> (Zugriff am: 31. Aug. 2022).
- [61] European Commission. "The Digital Markets Act: ensuring fair and open digital markets." https://ec.europa.eu/info/strategy/priorities-2019-2024/europe-fit-digital-age/digital-markets-act-ensuring-fair-and-open-digital-markets_en (Zugriff am: 19. Sep. 2022).
- [62] European Union, Hg., "Data Governance Act," Mai. 2022. Zugriff am: 19. September 2022. [Online]. Verfügbar unter: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/PDF/?uri=CELEX:32022R0868&from=EN>
- [63] European Commission. "COMMISSION STAFF WORKING DOCUMENT IMPACT ASSESSMENT REPORT: Accompanying the document Proposal for a Regulation of the European Parliament and of the Council on harmonised rules on fair access to and use of data Data Act." <https://digital-strategy.ec.europa.eu/en/library/impact-assessment-report-and-support-studies-accompanying-proposal-data-act> (Zugriff am: 19. Sep. 2022).
- [64] European Commission. "Artificial Intelligence Act." https://eur-lex.europa.eu/resource.html?uri=cellar:e0649735-a372-11eb-9585-01aa75ed71a1.0001.02/DOC_1&format=PDF (Zugriff am: 19. Sep. 2022).
- [65] European Commission. "Working document on data spaces." <https://digital-strategy.ec.europa.eu/en/library/staff-working-document-data-spaces> (Zugriff am: 19. Sep. 2022).
- [66] European Commission. "The EU's Cybersecurity Strategy for the Digital Decade." https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/en/ip_20_2391 (Zugriff am: 19. Sep. 2022).
- [67] European Commission. "Proposal for a COUNCIL REGULATION on establishing the European High Performance Computing Joint Undertaking." https://eur-lex.europa.eu/resource.html?uri=cellar:8c6b6f7e-f98c-11ea-b44f-01aa75ed71a1.0001.02/DOC_1&format=PDF (Zugriff am: 19. Sep. 2022).
- [68] European Union. "European Union scheme for rating the smart readiness of buildings." <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/PDF/?uri=CELEX:32020R2155&from=en> (Zugriff am: 19. Sep. 2022).
- [69] European Commission. "Proposal on Common European data spaces." <https://digital-strategy.ec.europa.eu/en/library/staff-working-document-data-spaces> (Zugriff am: 19. Sep. 2022).
- [70] European Commission. "Renewable energy directive (RED III)." https://energy.ec.europa.eu/topics/renewable-energy/renewable-energy-directive-targets-and-rules/renewable-energy-directive_en (Zugriff am: 19. Sep. 2022).
- [71] "New European Interoperability Framework Promoting seamless services and data flows for European public administrations," 2017. Zugriff am: 19. September 2022. [Online]. Verfügbar unter: https://ec.europa.eu/isa2/sites/default/files/eif_brochure_final.pdf
- [72] BDEW Bundesverband der Energie- und Wasserwirtschaft, Hg., "Digital@EVU 2021 — Wie ist der Stand der digitalen Transformation in der Energiewirtschaft?," 2021. Zugriff am: 19. September 2022. [Online]. Verfügbar unter: https://www.bdew.de/media/documents/DigitalEVU_2021_-_Stand_der_digitalen_Transformation_in_der_Energiewirtschaft_vF.pdf

- [73] Bundesverband der Energie- und Wasserwirtschaft e.V. (bdew), Hg., "Arbeitswelt der Zukunft im Energiesektor: Was zu tun ist, um den digitalen Wandel erfolgreich zu gestalten," Berlin, Jun. 2021. Zugriff am: 20. September 2022. [Online]. Verfügbar unter: https://www.capgemini.com/de-de/wp-content/uploads/sites/5/2021/06/BDEW_Capgemini_Arbeitswelt_der_Zukunft.pdf
- [74] Bundesverband der Energie- und Wasserwirtschaft e.V., Hg., "Digitale Transformation für die Energiewende – Energiewende für die digitale Transformation," Berlin, Sep. 2021. Zugriff am: 19. September 2022.
- [75] Bundesamt für Sicherheit in der Informationstechnik (BSI). "Technische Richtlinie (BSI-TR-03109-1)." https://www.bsi.bund.de/DE/Themen/Unternehmen-und-Organisationen/Standards-und-Zertifizierung/Smart-metering/Smart-Meter-Gateway/TechnRichtlinie/TR_03109-1_node.html (Zugriff am: 19. Sep. 2022).
- [76] Bundesamt für Sicherheit in der Informationstechnik (BSI). "Übersicht Schutzprofile und Technische Richtlinien." <https://www.bsi.bund.de/DE/Themen/Unternehmen-und-Organisationen/Standards-und-Zertifizierung/Smart-metering/Uebersicht-Schutzprofile-und-TR/uebersicht-schutzprofile-und-tr.html> (Zugriff am: 19. Sep. 2022).
- [77] S. Seim, P. Verwiebe, K. Blech, C. Gerwin und J. Müller-Kirchenbauer, "Die Datenlandschaft der deutschen Energiewirtschaft: Working Paper Energie und Ressourcen," Nov. 2019. Zugriff am: 19. September 2022. [Online]. Verfügbar unter: https://www.er.tu-berlin.de/fileadmin/a38331300/Dateien/Seim_Verwiebe_Blech_Gerwin_M%C3%BCller-Kirchenbauer_2019_-_Die_Datenlandschaft_der_dt_Energiewirtschaft_FG_E_R_TU_Berlin.pdf
- [78] LEW Verteilnetz GmbH, Hg., "connect+ Netzbetreiberkooperation: Implementation Guidelines," Version: 2.06, Jul. 2022. [Online]. Verfügbar unter: https://netz-connectplus.de/wp-content/uploads/2022/08/Implementation_Guidelines_2_06.pdf
- [79] L. Knüsel und P. Richard, "Die Datenökonomie in der Energiewirtschaft: Eine Analyse der Ausgangslage und Wege in die Zukunft der Energiewirtschaft durch die Datenökonomie," Berlin, Jul. 2022. Zugriff am: 19. September 2022. [Online]. Verfügbar unter: https://www.dena.de/fileadmin/dena/Publikationen/PDFs/2022/ANALYSE_Die_Datenoeconomie_in_der_Energiewirtschaft.pdf
- [80] B. Otto, S. Steinbuß, A. Teuscher und S. Lohmann, "Reference architecture model," Apr. 2019. Zugriff am: 19. September 2022. [Online]. Verfügbar unter: <https://internationaldataspaces.org/use/reference-architecture/>
- [81] Gaia-x, Hg., "Gaia-x - Architecture Document," Apr. 2022. Zugriff am: 19. September 2022. [Online]. Verfügbar unter: <https://gaia-x.eu/publication/gaia-x-architecture-document-22-04-release>
- [82] IDSA. "BDVA, FIWARE, GAIA-X and IDSA Launch Alliance to Accelerate Business Transformation in the Data Economy: Data Spaces Business Alliance - Unleashing the Data Economy." <https://internationaldataspaces.org/bdva-fiware-gaia-x-and-idsa-launch-alliance-to-accelerate-business-transformation-in-the-data-economy> (Zugriff am: 19. Sep. 2022).
- [83] IDSA. "OMEGA-X: An Energy Data Space to boost the European data economy." <https://internationaldataspaces.org/omega-x-an-energy-data-space-to-boost-the-european-data-economy/> (Zugriff am: 19. Sep. 2022).
- [84] Platoon. "Platoon: Website of the H2020 PLATOON project." (Zugriff am: 15. Sep. 2022).

- [85] V. Berkhout, C. Frey, A. Borchering, J. Gelhaar und J. Schneider. "EnDaSpace - moderne Datenökonomie in der Energiewirtschaft." <https://www.ief.fraunhofer.de/de/projekte/suche/2021/EnDaSpace.html> (Zugriff am: 19. Sep. 2022).
- [86] S. Kharboutli, S. Flemming und P. Bretschneider, "*Sektorenkopplung*" (Schriftenreihe Tiefenbohrung). Aachen: Wissenschaftliche Begleitforschung_ENERGIEWENDEBAUEN, RWTH Aachen University, Lehrstuhl für Gebäude- und Raumklimatechnik, 2018.
- [87] H. Nymoen, T. Kimpel und C. Kaschade, "Initiative „Bidirektionales Laden“: Positionspapier zu notwendigen regulatorischen Anpassungen im Kontext des bidirektionalen Ladens," Mrz. 2022. Zugriff am: 19. September 2022. [Online]. Verfügbar unter: <https://ceco.de/user/pages/downloads/14.bidirektionales-laden-von-eautos-als-schlüssel-zur-flexibilisierung-des-energiesystems/Initiative%20Bidirektionales%20Laden%20Positionspapier%20M%C3%A4rz%202022.pdf>
- [88] P. Richard und L. Vogel, "Elektromobilität in der digitalen Energiewelt: Beitrag der Digitalisierung zur kundenorientierten Einbindung der Elektromobilität im integrierten Energiesystem," Berlin, Dez. 2017. Zugriff am: 19. September 2022. [Online]. Verfügbar unter: https://www.dena.de/fileadmin/dena/Dokumente/Pdf/9249_Positionspapier_Elektromobilitaet_in_der_digitalen_Energiewelt.pdf
- [89] "Netzintegration von Elektromobilität – Branchenübergreifender Konsens und Aufgaben für die 20. Legislaturperiode," Okt. 2021. Zugriff am: 19. September 2022. [Online]. Verfügbar unter: https://www.plattform-zukunft-mobilitaet.de/wp-content/uploads/2021/10/NPM_AG5_Netzintegration.pdf
- [90] J. Wiesensthal, Astrid Aretzm, N. Ouanes und K. Petrick, "Energy Sharing: Eine Potenzialanalyse: Gemeinschaftlich Strom im Verteilnetz erzeugen und nutzen: Eine Studie zum Umsetzungsvorschlag im Rahmen von Artikel 22 der Erneuerbare-Energien-Richtlinie der EU," Berlin, Gutachten im Auftrag des Bündnisses für Bürgerenergie e.V., Mai. 2022. [Online]. Verfügbar unter: https://www.ioew.de/fileadmin/user_upload/BILDER_und_Downloaddateien/Publicationen/2022/Energy_Sharing_Eine_Potenzialanalyse_1.pdf
- [91] Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK), *Gesetz zur Digitalisierung der Energiewende*, 2016. Zugriff am: 19. September 2022. [Online]. Verfügbar unter: https://www.bmwk.de/Redaktion/DE/Downloads/Gesetz/gesetz-zur-digitalisierung-der-energie-wende.pdf?__blob=publicationFile&v=4
- [92] Bundesministerium der Justiz, *Gesetz über den Messstellenbetrieb und die Datenkommunikation in intelligenten Energienetzen 1*, 2022. Zugriff am: 19. September 2022. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.gesetze-im-internet.de/messbg/>
- [93] Bundesamt für Sicherheit in der Informationstechnik (BSI). "Zertifizierte Produkte - Intelligente Messsysteme." <https://www.bsi.bund.de/DE/Themen/Unternehmen-und-Organisationen/Standards-und-Zertifizierung/Smart-metering/Smart-Meter-Gateway/Zertifikate24Msbg/produkte.html> (Zugriff am: 19. Sep. 2022).
- [94] Bundesamt für Sicherheit in der Informationstechnik (BSI). "Zertifikatsnachweise nach § 25 MsbG." https://www.bsi.bund.de/DE/Themen/Unternehmen-und-Organisationen/Standards-und-Zertifizierung/Smart-metering/Administration-und-Betrieb/Zertifikate25Msbg/zertifikate25MsbG_node.html (Zugriff am: 19. Sep. 2022).
- [95] Bundesamt für Sicherheit in der Informationstechnik (BSI). "Technische Vorgaben für intelligente Messsysteme und deren sicherer Betrieb." https://www.bsi.bund.de/DE/Themen/Unternehmen-und-Organisationen/Standards-und-Zertifizierung/Technische-Richtlinien/TR-nach-Thema-sortiert/tr03109/TR-03109_node.html (Zugriff am: 19. Sep. 2022).

- [96] Bundesnetzagentur, Hg., "Geschäftsprozesse zur Kundenbelieferung mit Elektrizität (GPKE)," 2020. Zugriff am: 19. September 2022. [Online]. Verfügbar unter: https://www.bundesnetzagentur.de/DE/Beschlusskammern/BK06/BK6_83_Zug_Mess/831_gpke/gpke_node.html
- [97] Bundesnetzagentur, Hg., "Wechselprozesse im Messwesen (WiM)," 2020. Zugriff am: 19. September 2022. [Online]. Verfügbar unter: https://www.bundesnetzagentur.de/DE/Beschlusskammern/BK06/BK6_83_Zug_Mess/834_wim/BK6_WiM_node_neu.html
- [98] Bundesamt für Sicherheit in der Informationstechnik (BSI) und Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi), Hg., "Stufenmodell zur Weiterentwicklung der Standards für die Digitalisierung der Energiewende," Zugriff am: 20. September 2022. [Online]. Verfügbar unter: https://www.bsi.bund.de/SharedDocs/Downloads/DE/BSI/SmartMeter/Stufenmodell/Anhang.pdf?__blob=publicationFile&v=5
- [99] Handelsblatt. "Halbherziger Start: Energieunternehmen kritisieren die deutsche Smart-Meter-Strategie." <https://www.handelsblatt.com/unternehmen/energie/intelligente-stromzaehler-halbherziger-start-energieunternehmen-kritisieren-die-deutsche-smart-meter-strategie/28033840.html> (Zugriff am: 20. Sep. 2022).
- [100] Bundesverband neue Energiewirtschaft (bne). "bne-Pressemitteilung: Graichen kündigt Entbürokratisierungspaket bis Ende 2022 an." <https://www.bne-online.de/de/news/detail/bne-pressemitteilung-graichen-kuendigt-entbuerokratisierungspaket-bis-ende-2022-an/> (Zugriff am: 20. Sep. 2022).
- [101] Netzgesellschaft Düsseldorf mbH. "Rundsteuertechnik: Netzgesellschaft Düsseldorf erneuert Rundsteuertechnologie im Düsseldorfer Stadtgebiet." <https://www.netz-duesseldorf.de/zaehler/rundsteuertechnik/> (Zugriff am: 23. Sep. 2022).
- [102] connect+. "Kooperation." <https://netz-connectplus.de/home/projekt/> (Zugriff am: 20. Sep. 2022).
- [103] connect+. "Implementation Guide." <https://netz-connectplus.de/home/downloads/> (Zugriff am: 20. Sep. 2022).
- [104] Offis. "RD 3.0." <https://www.offis.de/offis/projekt/rd30.html> (Zugriff am: 20. Sep. 2022).
- [105] Bundesnetzagentur für Elektrizität, Gas, Telekommunikation, Post und Eisenbahnen und Bundeskartellamt, Hg., "Monitoringbericht 2021: Monitoringbericht gemäß § 63 Abs. 3 i. V. m. § 35 EnWG und § 48 Abs. 3 i. V. m. § 53 Abs. 3 GWB," Bonn, Dez. 2021. [Online]. Verfügbar unter: https://www.bundesnetzagentur.de/SharedDocs/Mediathek/Monitoringberichte/Monitoringbericht_Energie2021.pdf?__blob=publicationFile&v=2
- [106] CrowdStrike. "2022 Global Threat Report: Anpassen und Durchhalten: Eine tiefgehende Analyse der wichtigsten Ereignisse und Trends in der Cybersicherheit." <https://www.crowdstrike.de/ressourcen/reports/global-threat-report/> (Zugriff am: 19. Sep. 2022).
- [107] R. M. Lee, M. J. Assante und T. Conway, "Analysis of the Cyber Attack on the Ukrainian Power Grid: Defense Use Case," Mrz. 2016. Zugriff am: 19. September 2022. [Online]. Verfügbar unter: https://ics.sans.org/media/E-ISAC_SANS_Ukraine_DUC_5.pdf
- [108] Dragos. "CHERNOVITE's PIPEDREAM Malware Targeting Industrial Control Systems (ICS)." (Zugriff am: 19. Sep. 2022).
- [109] BDEW Bundesverband der Energie- und Wasserwirtschaft. "Whitepaper: Anforderungen an sichere Steuerungs- und Telekommunikationssysteme: Requirements for Secure Control and Telecommunication Systems." https://www.bdew.de/media/documents/Awh_20180507_OE-BDEW-Whitepaper-Secure-Systems.pdf (Zugriff am: 19. Sep. 2022).

- [110] Bundesamt für Sicherheit in der Informationstechnik (BSI), *Das IT-Sicherheitsgesetz - Kritische Infrastrukturen schützen*, 2016.
- [111] BSI – Bundesamt für Sicherheit in der Informationstechnik, Hg., „Das Smart-Meter-Gateway. Cyber-Sicherheit für die Digitalisierung der Energiewirtschaft,“ Bonn, Mai. 2022. Zugriff am: 19. September 2022. [Online]. Verfügbar unter: https://www.bsi.bund.de/Shared-Docs/Downloads/DE/BSI/Publikationen/Broschueren/Smart-Meter-Gateway.pdf?__blob=publicationFile&v=6
- [112] Bundesministerium der Justiz, *Verordnung zur Bestimmung Kritischer Infrastrukturen nach dem BSI-Gesetz (BSI-Kritisverordnung - BSI-KritisV)*, 2016. Zugriff am: 20. September 2022. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.gesetze-im-internet.de/bsi-kritisv/BJNR095800016.html>
- [113] Bundesgesetzblatt. „Zweites Gesetz zur Erhöhung der Sicherheit informationstechnischer Systeme.“ https://www.bgbl.de/xaver/bgbl/start.xav?startbk=Bundesanzeiger_BGBI&start=//%5B@attr_id=%27bgbl121s1122.pdf%27%5D#_bgbl_%2F%2F%5B%40attr_id%3D%27bgbl121s1122.pdf%27%5D__1663612186893https://www.bgbl.de/xaver/bgbl/start.xav?startbk=Bundesanzeiger_BGBI&start=//%5B@attr_id=%27bgbl121s1122.pdf%27%5D#_bgbl_%2F%2F%5B%40attr_id%3D%27bgbl121s1122.pdf%27%5D__1663612186893 (Zugriff am: 19. Sep. 2022).
- [114] G. Luderer *et al.*, „Report: Deutschland auf dem Weg zur Klimaneutralität 2045 – Szenarien und Pfade im Modellvergleich,“ 2021. [Online]. Verfügbar unter: <https://ariadneprojekt.de/publikation/deutschland-auf-dem-weg-zur-klimaneutralitaet-2045-szenarienreport/>
- [115] G. Thomaßen, C. Redl und T. Bruckner, „Will the energy-only market collapse? On market dynamics in low-carbon electricity systems,“ *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Jg. 164, S. 112594, 2022. doi: 10.1016/j.rser.2022.112594. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032122004907>
- [116] R. Fritz, K. Winter und E. Schlee, „Simulation von Sonnenfinsternissen zur Anwendung in PV-Einspeiseprognosen: Die Wetterprognose enthält keine SoFi? Dann rechnen wir den Effekt eben selbst rein!“, Fraunhofer IEE, Poster vom PV-Symposium / BIPV-Forum 2022, Jun. 2022. [Online]. Verfügbar unter: https://www.iee.fraunhofer.de/content/dam/iee/energiesystemtechnik/de/Dokumente/Poster/2022/2022_PVsymp_Poster_RFritz_FraunhoferIEE.pdf
- [117] M. Malcher und M. Puffe. „Ein Stresstest, kein Weltuntergang: die Sonnenfinsternis 2015.“ BBH Blog. <https://www.bbh-blog.de/alle-themen/energie/ein-stresstest-kein-weltuntergang-die-sonnenfinsternis-2015/>
- [118] J. Weniger, J. Bergner, T. Tjaden und V. Quaschnig, „Einfluss der Sonnenfinsternis im März 2015 auf die Solarstromerzeugung in Deutschland,“ Fachbereich 1 – Ingenieurwissenschaften Energie und Information, Berlin, Studie, Okt. 2014, doi: 10.13140/2.1.5190.4963.
- [119] International Renewable Energy Agency (IRENA), Hg., „Innovation landscape brief: Advanced forecasting of variable renewable power generation,“ Abu Dhabi, 2020. [Online]. Verfügbar unter: https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2020/Jul/IRENA_Advanced_weather_forecasting_2020.pdf?la=en&hash=8384431B56569C0D8786C9A4FDD56864443D10AF
- [120] Salzgitter AG. „Unser Programm SALCOS®.“ <https://salcos.salzgitter-ag.com/de/salcos.html>
- [121] A. Purkus, A. Sakhel, R. Werner und C. Maaß, „Herkunftsnachweise für Erneuerbare Energien jenseits des Stromsektors – Chancen und Herausforderungen,“ Hamburg, Rep. 1, 2020. [Online]. Verfügbar unter: <http://hdl.handle.net/10419/231399>

- [122] J. Schmidt und S. Adler, "Die digitale Lebenslaufakte - Stand der Normung," in *FF-Wissenschaftstage - Workshop »Digital Engineering & Operations«*, Fraunhofer-Institut für Fabrikbetrieb und -automatisierung IFF, Hg., Magdeburg, 2019.
- [123] T. Cioara *et al.*, "Exploiting data centres energy flexibility in smart cities: Business scenarios," *Information Sciences*, Jg. 476, S. 392–412, 2019, doi: 10.1016/j.ins.2018.07.010.
- [124] A. Kathirgamanathan, M. de Rosa, E. Mangina und D. P. Finn, "Data-driven predictive control for unlocking building energy flexibility: A review," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Jg. 135, S. 110120, 2021, doi: 10.1016/j.rser.2020.110120.
- [125] Å. Sørensen, K. B. Lindberg, I. Sartori und I. Andresen, "Analysis of residential EV energy flexibility potential based on real-world charging reports and smart meter data," *Energy and Buildings*, Jg. 241, S. 110923, 2021. doi: 10.1016/j.enbuild.2021.110923. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378778821002073>
- [126] J. Schütz, M. Uslar und M. Clausen, "Digitalisierung: Synthesebericht 3 des SINTEG Förderprogramms," Berlin, Studie im Auftrag des BMWK, Mai. 2022. [Online]. Verfügbar unter: https://www.sinteg.de/fileadmin/media/Ergebnisberichte/SF3_Digitalisierung/20220502-SINTEG-SyF3_bf.pdf
- [127] P. Hogeveen, M. Steinbuch, G. Verbong und A. Wargers, "Revisiting static charge schedules for electric vehicles as temporary solution to low-voltage grid congestion with recent charging and grid data," *Sustainable Energy, Grids and Networks*, Jg. 31, S. 100701, 2022, doi: 10.1016/j.segan.2022.100701.
- [128] S. Lehnhoff und J. Dorfner, "Redispatch 3.0," Artikel. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.bmwk.de/Redaktion/DE/Artikel/Digitale-Welt/GAIA-X-Use-Cases/redispatch-30.html>
- [129] J. Li, Z. Chen, L. Cheng und X. Liu, "Energy data generation with Wasserstein Deep Convolutional Generative Adversarial Networks," *Energy*, Jg. 257, S. 124694, 2022, doi: 10.1016/j.energy.2022.124694.
- [130] EUREC, Hg., "'Data Sharing' in the Renewable Energy Directive," Brüssel, Mai. 2022. [Online]. Verfügbar unter: https://eurec.be/cms/wp-content/uploads/RED_III-ams-on-Data-Sharing-final-1.pdf
- [131] S. Pagliarin, D. Herrmann, D. Nicklas, H. Glückert, J. Meyer und P. Vizitiu, "Data policy models in European smart cities : Experiences, opportunities and challenges in data policies in Europe," 2022, doi: 10.20378/irb-53583.
- [132] M. D. Wilkinson *et al.*, "The FAIR Guiding Principles for scientific data management and stewardship," *Scientific data*, Early Access. doi: 10.1038/sdata.2016.18.
- [133] Guidehouse, Hg., "BLAUPAUSEN FÜR DIE ENERGIEWENDE: Executive Summary der 5 Ergebnissynthesen zum Förderprogramm SINTEG," Aug. 2022. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.sinteg.de/fileadmin/media/Ergebnisberichte/20220811-SINTEG-ExecutiveSummary.pdf>
- [134] Catena-X Automotive Network e.V., Hg., "Catena-X: The first open and collaborative data ecosystem," 2022. [Online]. Verfügbar unter: https://catena-x.net/fileadmin/user_upload/Vereinsdokumente/Catena-X_UEbersicht.pdf
- [135] DRM Datenraum Mobilität GmbH. "Mobility Data Space." <https://mobility-dataspace.eu/de>
- [136] E. Thyen, "Quantensprung Digitalisierung – Energiewirtschaft im 21. Jahrhundert," in *Herausforderung Utility 4.0: Wie sich die Energiewirtschaft im Zeitalter der Digitalisierung verändert*, O. D. Doleski, Hg., Wiesbaden, Heidelberg: Springer Vieweg, 2017, S. 99–107.

- [137] VDE Verband der Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik e.V. Energietechnische Gesellschaft (ETG), Hg., "Systematisierung der Autonomiestufen in der Netzbetriebsführung," VDE Impuls, Jul. 2020. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.vde.com/resource/blob/1979790/a73eec5f684abdc94ba63b03232b00d5/vde-impuls--systematisierung-der-autonomiestufen-in-der-netzbetriebsfuehrung--data.pdf>
- [138] T. Schittekatte, V. Reif und L. Meeus, "Welcoming New Entrants into European Electricity Markets," *Energies*, Jg. 14, Nr. 13, S. 4051, 2021, doi: 10.3390/en14134051.
- [139] Sonnen. "Die Energie: erneuerbar. Die Gemeinschaft: unersetzlich." <https://sonnen.de/sonnencommunity/>
- [140] Energy Market Solutions. "Partner für die Energiemärkte von morgen." <https://www.energymarket.solutions/>
- [141] 1komma5grad. "Verbrauchernetzwerk." <https://www.1komma5grad.com/de>
- [142] Installion. "Die Plattform für Montage-Projekte." <https://installion.eu/>
- [143] S. Littlechild, "The CMA's assessment of customer detriment in the UK retail energy market," *J Regul Econ*, Jg. 57, Nr. 3, S. 203–230, 2020. doi: 10.1007/s11149-020-09408-x. [Online]. Verfügbar unter: <https://link.springer.com/article/10.1007/s11149-020-09408-x>
- [144] S. Enckhardt. "Bürokratie der Verteilnetzbetreiber steht vielerorts dem Anschluss kleiner Photovoltaik-Anlagen im Weg." <https://www.pv-magazine.de/2022/06/20/buerokratie-der-verteilnetzbetreiber-steht-vielerorts-dem-anschluss-kleiner-photovoltaik-anlagen-im-weg/>
- [145] bdew. "Eckpunkte des Vorschlags zur Digitalisierung und Standardisierung des Anschlussprozesses von Anlagen bis 30 kW installierter Leistung." https://www.bdew.de/media/documents/Beschleunigung_Netzanschlussbegehren_Eckpunkte__8_EEG.pdf
- [146] J. Pohl, A. Höfner, E. Albers und F. Rohde, "Design Options for Long-lasting, Efficient and Open Hardware and Software," *ÖW*, Jg. 36, O1, S. 20–24, 2021. doi: 10.14512/OEWO360120. [Online]. Verfügbar unter: <https://oekologisches-wirtschaften.de/index.php/oew/article/view/1788>
- [147] A. Baur *et al.*, "Strategien gegen die Flaschenhals-Rezession: Was hilft bei Lieferengpässen und steigenden Preisen," *ifo Schnelldienst*, Jg. 75, Nr. 01, S. 3–31, 2022. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.econstor.eu/handle/10419/250846>
- [148] sig Media GmbH & Co. KG. "Lieferketten: Studie sieht Risiken für die Energiewirtschaft." <https://www.50komma2.de/?p=29178>
- [149] European Commission, Directorate-General for Communication. "European Chips Act." https://ec.europa.eu/info/strategy/priorities-2019-2024/europe-fit-digital-age/european-chips-act_en
- [150] "Forschungsprojekt IKTfree: Hochverfügbarer Verteilungsnetzbetrieb bei Störung der IKT-Infrastruktur im Smart Grid." <https://www.iktfree.de/>
- [151] VDE Verband der Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik e.V. Energietechnische Gesellschaft (ETG), "7 Thesen zur Flexibilisierung des Energiesystems," 2021.
- [152] Fraunhofer CINES, Hg., "Die Deutsche Energiewende. 13 Thesen.," 2020.
- [153] frontier economics. "Sektorkopplung - eine integrierte Betrachtung: Bericht für innogy SE." https://www.frontier-economics.com/media/1121/20180205_sektorkopplung-eine-integrierte-betrachtung_frontier.pdf (Zugriff am: 19. Sep. 2022).

- [154] S. Kharboutli und S. Flemming, "Das Quartier als Stabilisierungsoption für das Gesamtenergiesystem.," 2018.
- [155] D.M.J. E4tech, D.C.S.-K. Fraunhofer OEE, "): Das gekoppelte Energiesystem - Vorschläge für eine optimale Transformation zu einer erneuerbaren und effizienten Energieversorgung," 2018.
- [156] M.-A. Triebel, A. Steingrube, G. Stryi-Hipp und P. Reggentin, "Modellierung sektorintegrierter Energieversorgung im Quartier: Untersuchung der Vorteile der Optimierung von Energiesystemen auf Quartiersebene gegenüber der Optimierung auf Gebäudeebene," Berlin, Apr. 2022. Zugriff am: 20. September 2022. [Online]. Verfügbar unter: https://www.dena.de/fileadmin/dena/Publikationen/PDFs/2022/STUDIE_Modellierung_sektorintegrierter_Energieversorgung_im_Quartier.pdf
- [157] J. Bayer *et al.*, "Zellulares Energiesystem: Ein Beitrag zur Konkretisierung des zellularen Ansatzes mit Handlungsempfehlungen," Frankfurt am Main, Mai. 2019. Zugriff am: 20. September 2022. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.vde.com/resource/blob/1884494/98f96973fcd8a70777654d0f40c179e5/studie---zellulares-energiesystem-data.pdf>
- [158] M. Ahlers und M. Speulda, "Das Quartier Teil 2: Analyse des Zusammenspiels und Aufzeigen von Schwachstellen," Berlin, 2022. Zugriff am: 20. September 2022. [Online]. Verfügbar unter: https://www.dena.de/fileadmin/dena/Publikationen/PDFs/2022/dena-STUDIE_Das_Quartier_-_Teil_2.pdf
- [159] VDI Verein Deutscher Ingenieure e.V., Hg., "Bausteine für eine klimaneutrale Wärmeversorgung," 2021.
- [160] H. Averfalk *et al.*, *Low-Temperature District Heating Implementation Guidebook: Final report of IEA DHC Annex TS2 Implementation of Low-Temperature district Heating Systems.* Stuttgart: Fraunhofer Verlag, 2021.
- [161] L. Schantey, J. Scheipers, C. Thommessen, N. Witte-Humperdinck, J. Roes und O. Verheyen. "Digitalisierung in Wärmenetzen." <https://fourmanagement.salesnation.com/studie-digitalisierung-waermenetze> (Zugriff am: 20. Sep. 2022).
- [162] AGFW - Der Effizienzverband für Wärme, Kälte und KWK e.V., Hg., "AGFW-Orientierungshilfe zur Digitalisierung in der Fernwärmebranche," Frankfurt am Main, 2019. Zugriff am: 20. September 2022. [Online]. Verfügbar unter: https://www.agfw.de/securedl/sdl-eyJ0eXAiOiJKV1QiLCJhbGciOiJIUzI1NiJ9.eyJpYXQiOiJlM2NDMxNzY-slMvV4cCl6MTY2MzczMzE3NCwidXNcil6MCwiZ3JvdXBzljpbMCwtMV0slmZpbGUiOiJmaWxIY-WRtaW5cL3VzZXJfdXBsb2FkXC9Gb3JzY2h1bmdfdV9Jbm5vdmF0aW9uXC9WZXJvZWZmZW50bGljaHVVuZ2VuXC9BR0ZXLU9yaWVudGllcnVuZ3NoaWxmZV9EaWdpdGFsaX-NpZXJ1bmdfVmVyb2VmZmVudGxpY2h1bmdfZmluYWwucGRmli-wicGFnZSI6NTk1fQ.xgglnfQaA5MmSoq6L9WVb1NdZRUGTF-V0dh44d_gMGE/AGFW-Orientierungshilfe_Digitalisierung_Veroeffentlichung_final.pdf
- [163] W. Birk *et al.*, "Digital Roadmap for District Heating and Cooling," Jul. 2019. Zugriff am: 20. September 2022. [Online]. Verfügbar unter: https://archive.euroheat.org/wp-content/uploads/2018/05/Digital-Roadmap_final.pdf
- [164] H. Lund *et al.*, "4th Generation District Heating (4GDH)," *Energy*, Jg. 68, S. 1–11, 2014, doi: 10.1016/j.energy.2014.02.089.
- [165] S. Copei, M. Wickert und A. Zündorf, "Implementation of a Microservice-Based Certification Platform," in *Agile Processes in Software Engineering and Extreme Programming – Workshops* (Lecture Notes in Business Information Processing), P. Gregory und P. Kruchten, Hg., Cham: Springer International Publishing, 2021, S. 186–191.

- [166] eot. "Digitale Maschinen-Identitäten – Grundbaustein für ein automatisiertes und verlässliches Energiesystem." <https://oil-telegram.de/news/Digitalisierung/digitale-maschinen-identitaeten-grundbaustein-fuer-ein-automatisiertes-und-verlaessliches-energiesystem> (Zugriff am: 20. Sep. 2022).
- [167] Umweltbundesamt. "Energiebedingte Emissionen." <https://www.umweltbundesamt.de/daten/energie/energiebedingte-emissionen#energiebedingte-treibhausgas-emissionen> (Zugriff am: 8. Aug. 2022).
- [168] Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz. "Deutsche Klimaschutzpolitik." <https://www.bmwk.de/Redaktion/DE/Artikel/Industrie/klimaschutz-deutsche-klimaschutzpolitik.html> (Zugriff am: 8. Aug. 2022).
- [169] F. Sensfuß *et al.*, "Langfristszenarien für die Transformation des Energiesystems in Deutschland 3: Kurzbericht: 3 Hauptszenarien," Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung ISI, Mai. 2021.
- [170] Bundesnetzagentur, *An-reiz-re-gu-lie-rung von Strom- und Gas-netz-be-trei-bern*. Zugriff am: 20. September 2022. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.bundesnetzagentur.de/DE/Fachthemen/ElektrizitaetundGas/Netzentgelte/Anreizregulierung/start.html>
- [171] H. Seidl, S. Mischinger und R. Heuke, "Beobachtbarkeit und Steuerbarkeit im Energiesystem: Handlungsbedarfsanalyse der dena-Plattform Systemdienstleistungen," Berlin, Jul. 2016.
- [172] envelio. "Netzanschluss." <https://envelio.com/de/igp/netzanschluss/> (Zugriff am: 20. Sep. 2022).
- [173] Europäische Kommission, *Gaseinsparungen für den Winter: Kommission schlägt Plan zur Senkung der Gasnachfrage vor, um EU auf Lieferkürzungen vorzubereiten*. Brüssel, 2022. [Online]. Verfügbar unter: https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/de/ip_22_4608
- [174] ENTSO-E. "Manually Activated Reserves Initiative." https://www.entsoe.eu/network_codes/eb/mari/
- [175] ENTSO-E. "PICASSO." https://www.entsoe.eu/network_codes/eb/picasso/