



# Zukunftsbild Energie

by VDE ETG

#### Empfohlene Zitierweise

VDE Verband der Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik e.V.: Zukunftsbild Energie,  
VDE Studie, Offenbach am Main, November 2022

Diese VDE Studie ist das Arbeitsergebnis der VDE ETG Task Force „Zukunftsbild Energie“.

#### Autorinnen und Autoren

Anna Pfendler, TU Darmstadt  
Anne Freiburger, ehemals IKEM  
Ben Gemsjäger, Siemens AG  
Charlotte Biele, TU Dortmund  
Christof M. Schneider, Westnetz GmbH  
Erik Zipperling, Bergische Universität Wuppertal  
Felix Nowack, ehemals IKEM  
Frederike Pfeifer, IKEM  
Johannes Leugner  
Martin Kleimaier  
Rainer Speh  
Sasan Jacob Rasti, TU Dresden  
Sebastian Wingender, E-DIS Netz GmbH  
Thomas Benz, VDE ETG  
Wiebke Beerens, Westenergie AG

#### Vorbemerkung

VDE Studien geben – entsprechend der Positionierung des VDE als neutraler, technisch-wissenschaftlicher Verband – gemeinsame Erkenntnisse der Mitglieder der Task Force wieder. Die Gemeinschaftsergebnisse werden im konstruktiven Dialog aus häufig unterschiedlichen Positionen erarbeitet. Die Studien spiegeln daher nicht unbedingt die Meinung der durch ihre Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter vertretenen Unternehmen und Institutionen wider.

#### Herausgeber:

VDE Verband der Elektrotechnik  
Elektronik Informationstechnik e.V.  
Energietechnische Gesellschaft (ETG)  
Merianstraße 28  
63069 Offenbach am Main  
Tel. +49 69 6308-346  
etg@vde.com  
www.vde.com/etg

Titelbild: © L. Durst, K. Flöter

Design: Schaper Kommunikation, Bad Nauheim

November 2022

# Executive Summary

Wir befinden uns derzeit an einem historischen Wendepunkt in der Energiepolitik und der weiteren Ausgestaltung des Energiesektors. Während der Haupttreiber für den Ausbau Erneuerbare Energien (EE) bisher vor allem die Bekämpfung der Klimakrise war, wird in der aktuellen Situation zudem deutlich, dass lokal verfügbare, erneuerbare Energiequellen in Kombination mit Speichern auch entscheidend zur Sicherheit, aber auch der Bezahlbarkeit der Energieversorgung beitragen können. Die Nutzung der Energie aus Sonne und Wind ist wirtschaftlicher geworden als der Bau neuer fossiler Kraftwerke. Im Jahr 2021 erreichte beispielsweise der Anteil erneuerbarer Energiequellen am gesamten Kapazitätsausbau im Stromsektor weltweit über 80 Prozent und stellt damit eine bezahlbare, sowie nachhaltige Stromversorgung bereit. Da sich jedoch das Dargebot aus erneuerbaren Quellen nicht nach dem aktuellen Energiebedarf richtet, müssen Lösungen gefunden werden, um hier den erforderlichen Ausgleich herzustellen. Hierzu gehören einerseits neben planbar einsetzbaren Erzeugungseinheiten auch Energiespeicher – sowohl als Kurzzeitspeicher für den Ausgleich im Stundenrhythmus – als auch Langzeitspeicher für die Überbrückung sog. Dunkelflauten und für den saisonalen Ausgleich. Andererseits wird auch lastseitig eine Anpassung an das EE-Dargebot angestrebt (Demand-Side-Management). Insbesondere die zusätzliche Stromnachfrage durch Sektorenkopplung wird sich am EE-Dargebot orientieren.

Die beschriebene Vision Energiesystem 2050 ist das Ergebnis von weitergehenden Überlegungen innerhalb der VDE ETG Task Force „Zukunftsbild Energie“. Diese Überlegungen sind zunächst unter anderem von dem Gedanken geprägt, dass sich Deutschland zu 100 % mit erneuerbarer Energie versorgen kann. Ein strom- und gasbasiertes Verbundsystem übernimmt die Energieübertragung und -verteilung, wobei auch weiterhin auf einen europäischen Austausch erneuerbarer Energie im großen Maßstab gesetzt wird. So ist dieser Ansatz keinesfalls als nationaler Alleingang zu verstehen, sondern als Beispiel, wie ein führendes Industrieland zwischen dem 47. und 55. nördlichen Breitengrad die Umsetzung einer klimafreundlichen Versorgung erreichen und zugleich einen wichtigen Beitrag für die zukünftige wirtschaftliche Entwicklung erzielen kann. Die Lösung und der Weg zur 100%-Versorgung mit erneuerbarer Energie wird so zu einem wichtigen Treiber für Wirtschaftswachstum und Wohlstand für ein an natürlichen Ressourcen armes Land.

Das zukünftige Energiesystem wird hierbei eine Kombination aus zentralen und lokalen Elementen in eher dezentralen Strukturen aufweisen. Es basiert auf kleineren und größeren Erzeugungseinheiten wie Photovoltaik, Onshore- und Offshore-Wind, wo möglich auch Geothermie, biogenen nachwachsenden Brennstoffen sowie Wasserkraft. Infolgedessen wird sich die Anzahl der Erzeugungseinrichtungen von heute etwa zwei Millionen immens erhöhen, mehr und mehr hin zu lokalen bzw. regionalen Einheiten mit eigenständiger Planung und Betrieb sowie Optimierung und zellulare Strukturen, wie sie heute bereits diskutiert und teilweise umgesetzt werden.

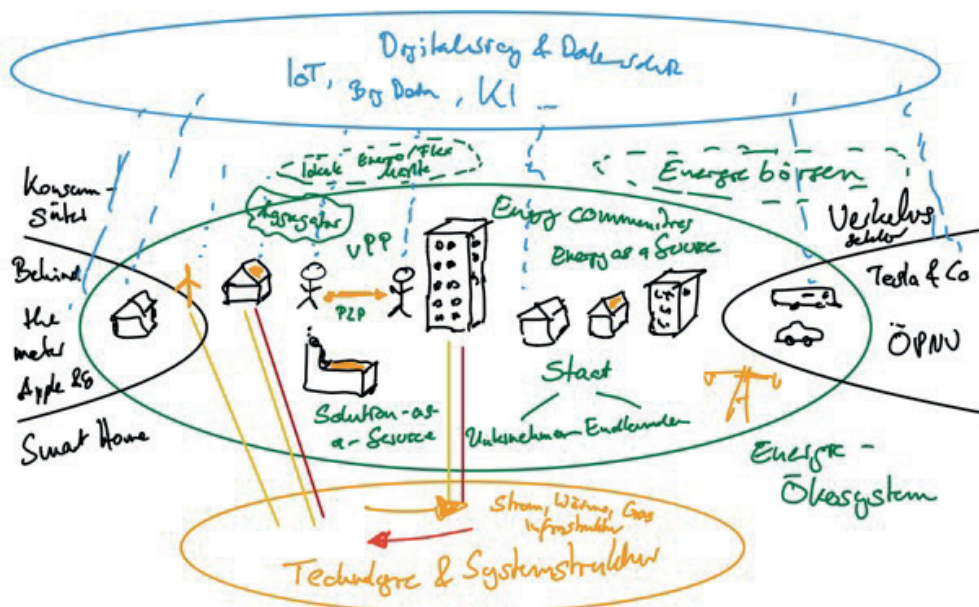


Abbildung 1: Skizze eines Energie-Ökosystems (eigene Darstellung)

Damit einhergehend ist, dass sich die Anzahl und Diversität von Marktteilnehmern stark vergrößern wird und sowohl technische als auch wirtschaftliche Aufgaben vermehrt auf lokaler und regionaler Ebene adressiert und gelöst werden müssen (Abbildung 1). Neue Marktteilnehmer wie Energiekommunen und Genossenschaften werden Spieler in diesen Märkten, an denen auch Akteure aus anderen Branchen und Industrien immer aktiver werden.

Wichtig wird dabei sein, das gesamte Energiesystem zu betrachten, also Elektrizität, Gas und Wärme, unter Einschluss von privaten, kommerziellen und industriellen Verbrauchern einschließlich der benötigten Energie für den Bereich Mobilität und Wärme. Die Verkehrs- und Wärmewenden werden damit vitaler und integraler Bestandteil der Energiewende vor allem durch die stärkere Elektrifizierung und Kopplung der verschiedenen Sektoren.

Allerdings erscheinen eine effiziente und sichere Sektorenkopplung und dezentrale Optimierung nur dann möglich, wenn die Möglichkeiten der fortschreitenden Digitalisierung und Automatisierung genutzt werden. Die Systemführung, insbesondere in zellularen Versorgungsstrukturen wird in festgelegten Zyklen (z. B. alle 15 Minuten) oder auch dynamisch flexibel die Balancierung der Erzeugung und des Verbrauchs managen, wobei die Bilanzierung innerhalb einer Zelle allerdings nicht im Vordergrund steht. Hierzu können die notwendigen Kommunikationsverbindungen zwischen den dezentral angeordneten Komponenten beispielweise vorhandene Infrastrukturen wie das Internet und private Router genutzt werden.

Dabei erhebt das „Zukunftsbild Energie“ keinen Anspruch auf Vollständigkeit, sondern soll vor allem zu weiteren Diskussionen und neuen Entwicklungen anregen. Sie basiert zudem auf der ebenfalls beschriebenen Metaanalyse von über 70 Studien zum Thema Energiewende, die von der Task Force durchgeführt wurde.

Um sich der beschriebenen Vision zu nähern, wurden folgende Handlungsempfehlungen entworfen, die sich an Fachwelt und Gesellschaft gleichermaßen richten:

- Die Untersuchungen und Vorschläge zum zukünftigen Energiesystem haben nochmals die **Komplexität des Vorhabens** aufgezeigt. Zur Koordination und Bewältigung der vielfältigen Aufgaben wird vorgeschlagen, eine **befugte und befähigte Institution** zu etablieren, die einen **systemischen Ansatz** u. a. für Energie, d. h. Strom und Wärme/Kälte, Verkehr und Bauwesen verfolgt.
- Der zellulare Ansatz, lokal, regional und deutschlandweit angewandt, gewährleistet eine erfolgreiche Energiewende und sollte als **Basis für weitere Entwicklungsschritte jetzt verbindlich angewendet werden**, um die Sektorenkopplung, die Laststeuerung sowie nachhaltige Geschäftsmodelle zu unterstützen.
- Der zellulare Ansatz ermöglicht eine hohe Resilienz bei hoher Automatisierung. Es ist verbindlich festzulegen und zu überprüfen, den **Datenaustausch auf das Notwendige zu reduzieren**.
- **Erneuerbarer Strom und erneuerbares Gas**, wie z. B. grüner Wasserstoff werden **gemeinsam** die Grundlage für unser Energiesystem bilden. Für diese zukünftige Energiewelt sind sowohl die **Transport- als auch die Verteilungsinfrastruktur** beider Energiemedien essenziell und werden eng miteinander gekoppelt sein. Bei **zeitlich ausgeglichener Erzeugung und Verbrauch** wird überwiegend das **Stromnetz** genutzt. **Gase** dienen vorrangig der **Speicherung von Energie für den Ausgleich von länger andauernden Ungleichgewichten** und für die erzeugungsferne Versorgung.
- Nicht die heutigen **Rahmenbedingungen und Regeln** formen die zukünftigen Lösungen, sondern müssen unter **Aspekten der Nachhaltigkeit den technischen Vorgaben und Notwendigkeiten folgen**.
- **Diskussionen über die Energiewende** mit regulatorischem Inhalt sind dahingehend zu führen, mit hoher Priorität **Vorschläge für das zukünftige Rahmenwerk** zu machen und nicht die Umgehung bestehender Regelungen zu definieren.

- Zur Sicherstellung einer zuverlässigen Energieversorgung verlangt die **volatile Erzeugungsscharakteristik** von erneuerbaren Ressourcen neben der **Flexibilisierung des Verbrauchs** sowohl den Einsatz von **Energiespeichern** für unterschiedliche Zeitbereiche und Anwendungen als auch steuerbar einsetzbare Erzeugungseinheiten. Hierfür ist ein gesondertes **Schwerpunktprogramm** zur Entwicklung von Technologien und Applikationen zu etablieren.
- Die deutsche **Wasserstoffstrategie** ist **kurzfristig** um den Einsatz von Wasserstoff als Grundlage für die (saisonale) **Speicherung von Energie** zu ergänzen.
- Als **Führungsgröße und Entscheidungshilfe** für die Energiewende sowie zur **Fortschrittskontrolle** sind die **Treibhausgasemissionen** einzusetzen und monetär über den jeweils aktuellen Zertifikatspreis zu bewerten.
- Für die künftigen Herausforderungen des Energiesystems sind mit Priorität Anpassungen bzw. Ergänzungen in der **schulischen, gewerblichen und universitären Ausbildung** notwendig. Dies gilt insbesondere für **gesamtheitliches Denken und Handeln** sowie für sämtliche **systemischen Aspekte**. Dabei sollte die Behebung des Fachpersonalmangels höchste Priorität genießen.
- Die **Zukunftssicherung** und die dringend benötigte **Beschleunigung** der Energiewende verlangen jetzt, die Innovationskraft und -geschwindigkeit der deutschen **Industrie** einschließlich des **Mittelstands** gezielt zu verbessern und zu fördern. Damit wird maßgeblich dazu beigetragen, dass im Inland erprobte Lösungen **weltweit vermarktet** und eingesetzt werden können.
- Für eine **erfolgreiche Energiewende** ist die gesellschaftliche Akzeptanz und somit **ein Beitrag** aller Bürgerinnen und Bürger **unabdingbar**.

# Inhaltsverzeichnis

Executive Summary	3
<b>A Veranlassung und Aufgabenstellung</b>	<b>8</b>
1 Veranlassung	8
2 Aufgabenstellung	9
<b>B Studienauswertung und Expertenanalyse</b>	<b>10</b>
1 Entwicklung von Energieerzeugung, -verbrauch und -versorgung bis 2050	10
1.1 Systemstruktur und Systemgrenzen	10
1.2 Zukünftige Energiequellen	12
1.3 Zukünftige Energienutzung	13
1.3.1 Verkehrswende	13
1.3.2 Wärmewende	16
1.4 Resultierende Energieverbräuche	20
1.5 Integrierte Energieversorgung	22
2 Marktstruktur und -teilnehmende im Energiehandel der Zukunft	27
2.1 Handelsgüter 2050	27
2.1.1 Physisch gebundene Energien	27
2.1.2 Elektrische Energie und Flexibilitätsoptionen	27
2.2 Handelsplätze und Kontraktformen für elektrische Energie	28
2.2.1 Strombörsen	28
2.2.2 Dynamische Stromtarife	29
2.2.3 Power Purchase Agreement (PPA)	29
2.2.4 Peer-2-Peer Handel (P2P)	29
2.2.5 Regionale Flexibilitätsmärkte	29
2.3 Akteure im Energiehandel	29
2.3.1 Moderne Energiedienstleister	30
2.3.2 Industrielle Prosumer	30
2.3.3 Kleine und mittlere Unternehmen (KMU) sowie Haushalte	31
2.3.4 Genossenschaften	31
3 Geschäftsmodelle in der Energiewirtschaft	31
3.1 Auswirkungen der Energiewende auf traditionelle Geschäftsmodelle	34
3.2 (Neue) Geschäftsmodelle 2050	35
3.3 Regulative Rahmenbedingungen	37
4 Digitalisierung und Datenschutz	40
4.1 Technologien	40
4.2 Messtechnik und Schnittstellen	41
4.3 Systemebene	42
4.4 Schutz, Sicherheit und Resilienz	42
4.5 Cyber Security	43

<b>C Vision Energiesystem 2050</b>	<b>45</b>
1 Einführung	45
2 Systemübersicht	45
2.1 Systemstruktur und Systemgrenzen	46
2.2 Energieerzeugung	48
2.2.1 Übersicht	48
2.2.2 Windenergie	49
2.2.3 Photovoltaik (PV)	50
2.2.4 Geothermie bzw. Erdwärme	51
2.2.5 Wasserkraft	51
2.2.6 Biogas und nachwachsende Rohstoffe	52
2.2.7 Repowering	53
2.3 Integrierte Energieversorgung	53
2.3.1 Einführung	53
2.3.2 Laststeuerung	54
2.3.3 Energiespeicher	55
2.3.4 Effizienz	56
2.3.5 Verkehrswende	57
2.3.6 Wärmewende	60
3 Wirtschaft und Politik	62
3.1 Marktstruktur und -teilnehmende	62
3.2 Energietarife und Geschäftsmodelle	62
3.3 Regulative Rahmenbedingungen	63
4 Digitalisierung und Datenschutz	65
4.1 Automatisierung und Technologien	65
4.2 Datenschutz	65
<b>D Handlungsempfehlungen</b>	<b>67</b>
Glossar	68
Literaturverzeichnis	71
Abbildungsverzeichnis	76

# A Veranlassung und Aufgabenstellung

## 1 Veranlassung

Die Energietechnische Gesellschaft im VDE (VDE ETG) beschäftigt sich mit allen Aspekten der elektrischen Energietechnik. Weitere Informationen sind unter [www.vde.com/etg](http://www.vde.com/etg) verfügbar.

Im Oktober 2019 nahm auf Veranlassung des VDE ETG Vorstands die Task Force „Zukunftsbild Energie“ ihre Arbeit auf. Als Mitglieder konnten überwiegend junge Expertinnen und Experten gewonnen werden.

Ziel der Task Force ist die Erarbeitung eines gemeinsamen und allgemein verständlichen Bildes für das Energiesystem der Zukunft. Die Ergebnisse sollen Gesellschaft, Politik und Experten als Orientierung für Entscheidungen bezüglich der Weiterentwicklung eines klimaverträglichen sektorengekoppelten Energiesystems dienen. Dieses Vorgehen adressiert im Wesentlichen Expertinnen und Experten des gesamten Energiesektors.

Um zusätzlich die breite Öffentlichkeit zu erreichen, aber auch um die Akzeptanz zu erhöhen, sollen sowohl technische als auch nicht technische Aspekte aus Anwendersicht vermittelt werden. Auf den Punkt gebracht bedeutet das die Frage zu beantworten, „Was bringt mir die Energiewende und wie kann (und muss) ich selbst aktiv zum Gelingen der Energiewende beitragen?“.

Während der Erstellung dieses Dokuments wurde zunächst das Ziel für Klimaneutralität der Bundesrepublik Deutschland vom Jahr 2050 auf das Jahr 2045 vorgezogen. Dieses hatte jedoch keine wesentlichen inhaltlichen bzw. technischen Auswirkungen. Insofern sind die gemachten Aussagen auch für das Jahr 2045 sowie auch für die angestrebten Zwischenziele gültig und anwendbar. Jedoch beschleunigten bzw. intensivierten sich die Diskussionen um die Umsetzung der Energiewende durch die politischen Entwicklungen seit dem 24. Februar 2022 gravierend. Die (Zwischen-) Ergebnisse dieser Entwicklungen und Diskussionen können in dem vorliegenden Dokument nur teilweise explizit berücksichtigt werden.

Es gilt allerdings zu betonen, dass wir derzeit an einem historischen Wendepunkt in der Energiepolitik und der weiteren Ausgestaltung des Energiesektors stehen. Die Nutzung der Energie aus Sonne und Wind ist wirtschaftlicher geworden als der Bau neuer fossiler Kraftwerke. Die Stromgestehungskosten für Strom aus Sonne oder Wind haben im Vergleich zu fossilen Ressourcen den „Break-even“ erreicht und werden diesen Vorteil in den kommenden Jahren und Jahrzehnten noch weiter ausbauen. Im Jahr 2021 erreichte beispielsweise der Anteil erneuerbarer Energiequellen am gesamten Kapazitätsausbau im Stromsektor weltweit über 80 Prozent und stellt damit eine bezahlbare, sowie nachhaltige und sichere Stromversorgung bereit. Während der Haupttreiber für erneuerbare Energien bisher vor allem die Klimakrise war, wird in der aktuellen Situation deutlich, dass erneuerbare Energiequellen außerdem entscheidend zur Sicherheit der Energieversorgung beitragen. Europäische Länder wie Deutschland, Österreich und Polen, die bisher stark von fossilen Ressourcen aus Russland abhängig waren, ändern nun ihre Strategie und planen, ihre Abhängigkeit von Primärenergieimporten durch die Installation erneuerbarer Energien zu ersetzen, um die benötigte Energie vor Ort zu erzeugen.



## 2 Aufgabenstellung

Die anfängliche Euphorie zur Energiewende ist in vielen Teilen der Bevölkerung verflogen. Auch im Expertenkreis ist eine gewisse Ernüchterung erkennbar. Die Gründe hierfür sind vielschichtig und abhängig von der jeweiligen Perspektive und der damit verbundenen Erwartungshaltung.

Verfolgt man im Detail die Diskussionen und schaut man sich die zahlreichen Veröffentlichungen an ist festzustellen, dass sie weitgehend auf technische Aspekte begrenzt sind. Beispielhaft sei hier der sechste Monitoring-Bericht der Bundesregierung zur Energiewende genannt [1].

Neben den technischen Punkten werden aber auch Fragen der Partizipation, der Gerechtigkeit und Ethik sowie der Energiearmut behandelt. Allerdings findet dies parallel und weitgehend entkoppelt statt [2].

Das allgemeine Desinteresse ist auch darin begründet, dass die heutige Wahrnehmung des klassischen Energiesystems einer starken Wandlung unterliegt [3]. In Zukunft wird u. a. eine aktivere Beteiligung aus Verbrauchersicht notwendig sein.

Wie bereits eingangs erwähnt fehlen hierzu die passend aufbereiteten und notwendigen Informationen im Sinne der bereits oben gestellten Frage zur Energiewende. Dieser Aufgabenstellung hat sich die Task Force „Zukunftsbild Energie“ angenommen.

Das vorliegende Dokument besteht im Wesentlichen aus zwei Teilen. Im ersten Teil werden die Ergebnisse von insgesamt mehr als 70 untersuchten Studien zum Thema Energiewende in Form einer Metastudie dargestellt. Dabei wird das Jahr 2050 bzw. 2045 als Zieltermin und das Jahr 2030 als Etappenziel angenommen.

Der zweite Teil zeigt ein von der Task Force entwickeltes energetisches Gesamtsystem auf, das sich nur bedingt auf existierende Dokumente bezieht. In den Kapiteln Systemstruktur und Systemgrenzen, Energieerzeugung\*) und integrierte Energieversorgung, Marktstruktur und -teilnehmende, Energietarife und Geschäftsmodelle sowie Digitalisierung und Datenschutz werden verschiedene Aspekte in allgemein verständlicher Form beschrieben, um das Thema der breiten Öffentlichkeit zu vermitteln.

Die Vision Energiesystem 2050 erhebt weder Anspruch auf Vollständigkeit noch Richtigkeit. Dabei wird der Gedanke verfolgt, dass sich Deutschland im Jahre 2045/2050 zu 100 % mit erneuerbarer Energie – strom- und gasbasiert im Verbundsystem – versorgen kann. Grundsätzlich sollen damit weitere Diskussionen angeregt werden, die über das heute vorhandene Wissen und bestehende Zielsetzungen hinausgehen.

\*) Für das allgemeine Verständnis wird in diesem Dokument der Begriff „Energieerzeugung“ verwendet wohl wissend, dass dies physikalisch nicht möglich ist. Es müsste richtigerweise „Energiewandlung“ heißen.

# B Studienauswertung und Expertenanalyse

## 1 Entwicklung von Energieerzeugung, -verbrauch und -versorgung bis 2050

### 1.1 Systemstruktur und Systemgrenzen

Bei der Entwicklung eines klimafreundlichen Zukunftsbilds des Energiesystems 2050 verfolgt die ETG das Ziel, einen möglichst ganzheitlichen Ansatz zu wählen. Wichtig ist es, dass die Systemgrenzen eindeutig sind, die Bedeutung der aufgeführten Aussagen interpretierbar bleiben und sich in ihrem zugrundeliegenden Zusammenhang verstehen lassen. Dieser liegt, angelehnt an den Rahmen der ausgewerteten Studien, hauptsächlich auf dem Gebiet der Bundesrepublik Deutschland als Standort der Veranlassung. Internationale Entwicklungen werden ebenso berücksichtigt, nicht aber in derselben Detailtiefe erörtert.

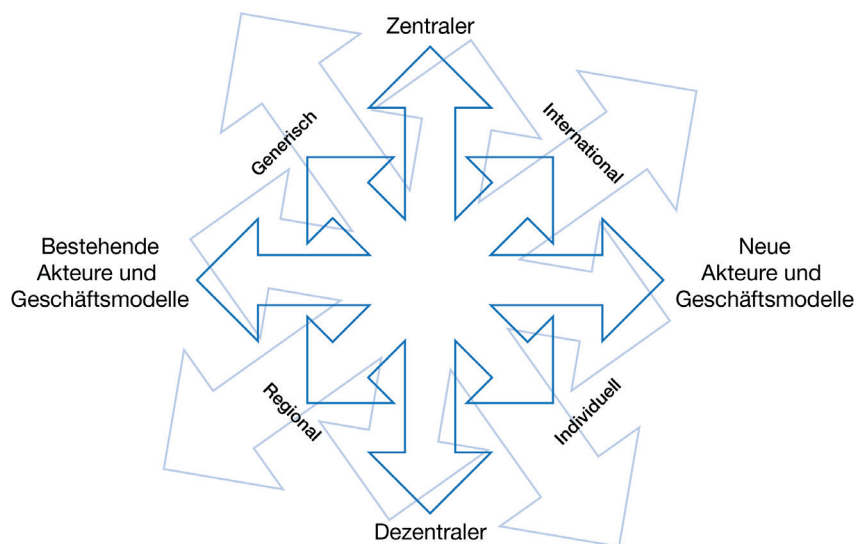


Abbildung 2: Systemstruktur und Systemgrenzen (eigene Darstellung)

Wie in Abbildung 2 dargestellt sind die systemischen Aspekte vieldimensional miteinander verknüpft und beeinflussen sich gegenseitig. So zeigen sich beispielsweise bei den möglichen Systemstrukturen sowohl zentralere, als auch dezentralere Ansätze, welche wiederum neue – unter Umständen gegensätzliche – Marktmechanismen und eine Diversifizierung von Marktteilnehmern bedingen.

Die für 2050 angepeilten Ziele lassen sich nach Auswertung der Studien nicht durch einen einzelnen Ansatz, sondern vielmehr nur durch einen ausgewogenen Mix aus zentralen und dezentralen Ansätzen erreichen. Diese umschließen eine intelligente Infrastruktur, welche sowohl das internationale Übertragungsnetz als auch die nachgelagerten Verteilnetze beinhaltet. Der benötigte Ausbaubedarf geht hierbei deutlich über das Maß der aktuellen Netzentwicklungspläne hinaus.

#### Infobox Zentrale Ansätze

Zentrale Ansätze beinhalten u. a. auf der Erzeugungsseite Großkraftwerke, wie zum Beispiel Gas- oder Offshore-Windkraftwerke. Die Kraftwerke sind durch ein internationales Übertragungsnetz miteinander verbunden. Ähnlich dem Energieübertragungsweg wird in zentralen Ansätzen von einem einheitlichen Preissystem für alle Marktteilnehmer ausgegangen, welches regional nur in geringem Ausmaß schwankt.

### Infobox Dezentrale Ansätze

Dezentrale Ansätze beinhalten auf der Erzeugungsseite vor allem den Einsatz von Onshore-Windkraftwerken und Photovoltaik-Anlagen, aber auch Anlagen zur Kraft-Wärme-Kopplung (KWK), z. B. auf Basis von Biogas. Ergänzt durch Kurzzeit-Speicher werden diese in der Regel durch ein Verteilnetz mit dem Endverbraucher verbunden, ein internationales Übertragungsnetz rückt in dieser Betrachtung bei vielen Studien in den Hintergrund.

Die zukünftig benötigten großen Mengen erneuerbarer Energie können dabei nicht ausschließlich im kleinen dezentralen Maßstab gewonnen werden. Potenziale von örtlich weit entfernten Großkraftwerken stellen eine nicht minderwichtige Komponente zur Erreichung der Ziele und zur Sicherstellung einer großflächigen Versorgungssicherheit dar. Es sei erwähnt, dass eine individuelle Energieautarkie einzelner Regionen kein Ziel der Energiewende darstellt.

Aus sich wandelnden Erzeugungs- und Verbrauchsstruktur folgen zudem neue Herausforderungen für den Transport und die Verteilung von elektrischer Energie in Deutschland. Unter anderem erfordert der steigende Bedarf von Energietransport aus dem Norden in den Süden eine dementsprechende Anpassung der Netzinfrastruktur auf Übertragungsebene.

Auf Verteilungsebene lassen sich die treibenden Faktoren nach der jeweiligen Spannungsebene unterscheiden und räumlich zweiteilen. Während die Steigerung der dezentralen Erzeugungskapazität flächenbedingt vor allem im ländlichen Raum und auf allen Spannungsebenen stattfinden wird, wird ein Großteil der zusätzlichen Verbraucher (Elektromobilität, Wärmepumpen) voraussichtlich vor allem im städtischen Raum und auf den unteren Spannungsebenen an die Netze angeschlossen. Somit werden ländliche Verteilnetze zumeist die „Quellen“ elektrischer Energie darstellen, während städtische Verteilnetze als „Senken“ den produzierten Strom aufnehmen.

Um die daraus resultierenden Herausforderungen wie Betriebsmittelüberlastung und Spannungsbandverletzungen zu lösen, gibt es nun verschiedene Maßnahmen die von eher klassischen Maßnahmen wie dem Netzausbau bis hin zu innovativen Maßnahmen wie beispielsweise Last- bzw. Einspeisemanagement reichen.

Eine Möglichkeit ist das Instrument des Netzausbaus. Das heißt, dass vorhandene Leitungen ersetzt oder neue errichtet werden, sodass zusätzliche Leistung über diese Korridore fließen kann [4]. Der notwendige Netzausbau wird dabei im Rahmen des Netzentwicklungsplans bestimmt. Der notwendige Netzausbau leitet sich dabei aus der Vorhersage der zukünftigen Leistungsflüsse ab. Diese ergeben sich aus dem festgelegten Szenario. Jedoch gibt es verschiedene Umsetzungsproblematiken, die einen raschen Netzausbau erschweren. Dabei stehen vor allem die Kosten und Genehmigungsverfahren im Mittelpunkt. So kommt es, vor allem bei der Errichtung neuer Freileitungen, immer wieder zu Akzeptanzproblemen in der Bevölkerung. Kabel als Alternative bedeuten jedoch einen höheren Investitionsaufwand, langwierige Bauprozesse und neue technologische Herausforderungen. Folglich kommt es zu Verzögerungen beim Netzausbau. Aufgrund dessen, wird vermehrt an alternativen Maßnahmen zur besseren Ausnutzung der vorhandenen Übertragungskapazitäten geforscht. Dazu gehören etwa das kurative Engpassmanagement, sowie der Einsatz von virtuellen Leitungen. Bei virtuellen Leitungen werden mehrere Speicher in Engpasssituationen antiparallel geladen und entladen, sodass sie über eine begrenzte Zeit das Verhalten einer Leitung nachbilden können. Zu einem Zeitpunkt mit einem weniger stark ausgelasteten Netz können dann die notwendigen Ladestände wiederhergestellt werden [4-6].

Mit der Maßgabe, das Energiesystem auch wirtschaftlich darstellen zu können, müssen Handlungspotenziale weitgehend ausgeschöpft werden. Dazu empfehlen sich neben dem genannten Infrastrukturausbau vor allem einheitliche europäische Strompreise und eine gemeinsame europäische Energieimport- und Exportwirtschaft. Unter der Schaffung einer weitestgehend entschlackten Regulatorik und dem Setzen wirtschaftlicher, technologieoffener Anreize zum Ausbau der erneuerbaren Energien sorgen wachsende Märkte, eine zunehmende Digitalisierung und die große Anzahl neuer Marktteilnehmer dafür, dass neue Geschäftsmodelle entstehen können – ob mit oder vor allem auch ohne Subventionen [7-9]. Eine detaillierte Betrachtung der zu erwartenden Energiequellen erfolgt im nachfolgenden Kapitel.

## 1.2 Zukünftige Energiequellen

Um eine Absenkung der CO<sub>2</sub>-Emissionen bis zum Jahr 2050 in Deutschland um 80 bis 95 Prozent über alle Sektoren zu erreichen, müssen fossile Energieträger weitgehend substituiert werden (Dekarbonisierung). Dafür muss zunächst die Stromerzeugung nahezu vollständig auf erneuerbare Energien umgestellt und elektrische Energie auch in den anderen Sektoren genutzt werden. Dies wird in Deutschland insbesondere Wind- und Solarenergie sein. Von geringerer Relevanz werden Wasserkraft, Biomasse/Biogas und Geothermie sein.

Die Studien, die der vorliegenden Einschätzung zugrunde gelegt werden, verwenden unterschiedliche Ansätze, bzw. haben in verschiedenen Szenarien unterschiedliche Verteilungen der einzelnen Energieträger angenommen. Während stärker windbasierte Szenarien Erzeugungsschwerpunkte im Norden zur Folge hätten – insbesondere durch den Einsatz von Offshore-Windenergieanlagen – wäre bei einer stärkeren Durchdringung mit Photovoltaik mit einer gleichmäßigeren lokalen Verteilung, jedoch mit einem Schwerpunkt in Süddeutschland, zu rechnen.

Windenergie ist insbesondere in den Küstenregionen durch hohe Volllaststunden attraktiv. In der Mitte Deutschlands und im Süden nehmen die Volllaststunden ab, wobei die Werte in den Mittelgebirgen wiederum recht hoch sind. Die Potenziale der Windenergie sind im Winterhalbjahr höher als im Sommerhalbjahr, wodurch sie die Solarenergie sehr gut ergänzen. Der heutige Trend geht zu möglichst hohen Türmen mit großen Rotordurchmessern bei gleichzeitig reduzierter spezifischer Generatorleistung. Dadurch können höhere Volllaststunden erreicht und die Stromerzeugung gleichmäßiger gestaltet werden. In vielen Regionen stoßen heute neue Windenergieanlagen (WEA) jedoch auf Akzeptanzprobleme in der betroffenen Bevölkerung. Offshore-WEA haben diese Probleme nicht, führen allerdings trotz guter Windverhältnisse zu höheren spezifischen Stromerzeugungskosten aufgrund des erhöhten Aufwands bei der Errichtung im Vergleich zu Onshore-WEA. Da sich derzeit viele Verbrauchszentren in südlicheren Landesteilen befinden, muss auch der Energietransport von einer Offshore-Erzeugung zu diesen Lastzentren in einer gesamtheitlichen Betrachtung Berücksichtigung finden.

Die Stromerzeugung mit Photovoltaik-Anlagen (PV) liefert insbesondere im Sommerhalbjahr gute Werte. PV-Anlagen auf Dächern und an Fassaden finden üblicherweise eine gute Akzeptanz. Während früher ausschließlich nach Süden ausgerichtete Dachflächen für PV in Frage kamen, werden jetzt aufgrund der stark gesunkenen Preise für PV-Paneele zunehmend auch auf Dachflächen mit Ost- bzw. West-Ausrichtung PV-Anlagen errichtet. Dadurch kann die PV-Stromerzeugung in gewissen Grenzen vergleichmäßigt und die Problematik einer ausgeprägten Erzeugungsspitze in den Mittagsstunden etwas entschärft werden. Mit größeren Freiflächenanlagen können zwar günstigere Stromerzeugungskosten erzielt werden, diese stehen aber gelegentlich auch in Konkurrenz zu einer landwirtschaftlichen Nutzung dieser Flächen. Neuere Ansätze mit sog. Agri-PV-Anlagen sollen in Zukunft auch eine doppelte Nutzung für Landwirtschaft und Stromerzeugung ermöglichen.

Die aktuelle Ausbaugeschwindigkeit sowohl von WEA als auch PV-Anlagen reicht bei weitem nicht aus, um die angestrebten Klimaziele bis zum Jahr 2050 zu erreichen.

Eine zeitlich und örtlich bedarfsgerechte Leistungsbereitstellung kann aufgrund des fluktuierenden Dargebots weder von der Sonne noch aus Wind zu jeder Zeit in der erforderlichen Höhe gewährleistet werden. Ein regions- bzw. länderübergreifender Energieaustausch über die Stromnetze kann zwar einen gewissen Beitrag zur Vergleichmäßigung liefern, welcher allerdings nicht ausreicht, um einerseits das EE-Dargebot möglichst vollumfänglich direkt nutzen zu können und andererseits einen zeitweisen Mangel an EE-Einspeisung ausgleichen zu können.

Die Einspeisungen aus den erneuerbaren Quellen sind zwar in gewissem Maße prognostizierbar, aber im Sinn einer gesicherten Versorgung nicht planbar. Eine sichere Stromversorgung benötigt jedoch in jedem Augenblick eine ausgeglichene Bilanz zwischen Erzeugung und Bedarf. Daher sind Möglichkeiten zur Flexibilisierung sowohl auf der Erzeugungs- als auch auf der Lastseite nötig. Neben einem Energieausgleich im Minuten-, Stunden- und Tagesrhythmus muss eine dem Bedarf entsprechende Stromerzeugung jedoch auch in Extremsituationen gewährleistet werden und saisonale und überjährige Erzeugungsunterschiede ausgleichen. In Mitteleuropa können insbesondere in den Wintermonaten Wetterlagen auftreten, bei denen großflächig über mehrere Tage kaum Wind weht, bei gleichzeitig sehr eingeschränkter Sonneneinstrahlung (als Dunkelflaute bezeichnet). Da auch in diesen Perioden immer noch ein gewisses EE-Erzeugungspotenzial vorhanden ist, wird sich die Situation mit

steigendem EE-Ausbau etwas entschärfen, sofern nicht gleichzeitig auch unflexible Lasten entsprechend ausgebaut werden.

Neben der Nutzung des in Deutschland möglichen Dargebots an Erneuerbaren Energien werden auch Energieimporte zu diskutieren sein. Hierfür würde einerseits die in Deutschland nicht flächendeckend vorhandene Akzeptanz von EE-Anlagen – insbesondere von Windenergieanlagen – sprechen. Andererseits wird man auch aus meteorologischen und ökonomischen Gründen auf Energieimporte nicht verzichten können, wenn in anderen Ländern günstigere Konditionen gegeben sind. Ein Stromaustausch über das europäische Verbundnetz kann regionale Unterschiede bei Erzeugung und Verbrauch auch über große Distanzen relativ kostengünstig ausgleichen. Ein Ausgleich auch über längere Zeiträume wird zukünftig durch das Angebot von „grünem“ Wasserstoff ermöglicht werden.

Neben technischen Herausforderungen müssen insbesondere auch die regulatorischen Rahmenbedingungen angepasst werden, damit sowohl die Effizienzpotenziale genutzt als auch der Ausbau der Erneuerbaren Energien umwelt- und sozialverträglich in dem erforderlichen Rahmen vorangetrieben werden können.

Unter dem Gesichtspunkt, dass in allen Sektoren die fossilen Energieträger durch Erneuerbare Energien substituiert werden müssen, wird eine möglichst umfängliche Zielerreichung nicht gelingen, solange die Nutzung fossiler Energieträger weiterhin zu kostengünstigeren Lösungen führt. Auf dem Weg zu einer klimaneutralen Energieversorgung ist eine technologieoffene Diskussion in einem Level Playing Field erforderlich.

Beim Umstellungsprozess darf auch die heute noch vorhandene breite Akzeptanz der Bevölkerung für die Energiewende nicht aufs Spiel gesetzt werden. Vielmehr müssen die erforderlichen Maßnahmen möglichst transparent vermittelt und die Bevölkerung muss so weit wie möglich in die Entscheidungsprozesse eingebunden werden. Hierzu müssen langfristig verlässliche Rahmenbedingungen geschaffen werden, damit Wirtschaft und Bürger in geeignete umweltfreundliche Technologien investieren können.

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass Solarenergie (PV) und Windenergie die vorrangigen Energiequellen sind. Zusätzlich werden Flexibilitäten benötigt, die bei EE-Mangel einspringen. Hierzu zählen u. a. steuerbare, planbar einsetzbare Erzeuger und Speicher.

## 1.3 Zukünftige Energienutzung

Es gibt viele Faktoren, die den zukünftigen Energieverbrauch beeinflussen. Dazu zählen technologische, als auch demographische Entwicklungen. Durch die Dekarbonisierung spielen insbesondere Veränderungen im Mobilitäts- als auch im Wärmesektor eine wesentliche Rolle. Diese wird in den folgenden Unterkapiteln erläutert bevor anschließend eine Übersicht über Einflussfaktoren auf Strom- und Energieverbräuche und deren Trends gegeben wird.

### 1.3.1 Verkehrswende

Sowohl im Personen- als auch im Güterverkehr wird eine deutliche Reduzierung der CO<sub>2</sub>-Emissionen im Rahmen des Klimaschutzplans 2050 der Bundesregierung politisch angestrebt [10], wobei insbesondere der straßengebundene Personenverkehr in Form des motorisierten Individualverkehrs (MIV) in besonderem Fokus steht. Der Straßenpersonenverkehr macht in Deutschland den größten Anteil des Verkehrsaufkommens bzw. der erbrachten Verkehrsleistung (73,4 % im Jahr 2019) aller Verkehrsmodi aus [11].

Ein wesentlicher Ansatz zur nachhaltigeren Gestaltung des Verkehrs liegt im Konzept der Verkehrswende mit ihren drei Teilelementen des Verbesserns, Verlagerns („Modal Shift“) und Vermeidens von Verkehr. Die hierbei am stärksten frequentierte Strategie ist die des Verbesserns von Verkehrsangeboten und -mitteln im Sinne technischer Verbesserungen, die ihre Energieeffizienz erhöhen. Die Energiewende im Verkehr setzt als Teilelement der Verkehrswende hier an und zielt insbesondere im straßengebundenen Kraftverkehr auf den Einsatz elektrischer Antriebe und alternativer Kraftstoffe (z. B. CNG/LNG, synthetische Kraftstoffe, Wasserstoff) bei Pkw, Nutzfahrzeugen und Bussen ab.

Die Verlagerung von Verkehr zielt darauf ab, ein bestehendes Verkehrsaufkommen auf weniger umwelt- und klimaschädliche Verkehrsmittel bzw. -träger zu verlagern, so z. B. die Verlagerung des Straßengüterverkehrs (Lkws) auf die Schiene oder der Umstieg vom MIV auf den öffentlichen Perso-

nenverkehr. Die Vermeidung von Verkehr ist die in der Praxis bisher am wenigsten etablierte Strategie. Der Ansatz zielt auf eine Reduktion des durch verschiedene Quellen induzierten Verkehrsaufkommens ab. Erreicht werden soll dies beispielsweise durch Ansätze der Stadt- und Regionalplanung (u. a. „Stadt der kurzen Wege“ [12]) und Mobilitätsmanagement [13]. Im Handel wird weiter mit dem Anstieg des e-Commerce (Online-Handel) gerechnet. Die Vermeidung von Lieferfahrten durch effiziente Bündelung wird hier als Strategie vorgeschlagen [14].

### Entwicklungen im Verkehrssektor mit Auswirkungen auf die Energiewende

Im Rahmen der Energiewende spielen bei der Betrachtung der Entwicklungen im Verkehrssektor neben möglichen Veränderungen im Mobilitätsverhalten (Personenverkehr), der Nutzung von alternativen Antrieben und Kraftstoffen sowie neuen Verkehrsangeboten (Personen- und Güterverkehr), auch die Entwicklung von Verkehrsaufkommen und -leistung im Personen- und Güterverkehr, die ggfs. unterschiedlichen Entwicklungen unterliegen, eine wesentliche Rolle. Diese korrelierte in den vergangenen Jahrzehnten zumeist mit der konjunkturellen Entwicklung in Deutschland, sodass mit wenigen Ausnahmen ein kontinuierliches Wirtschafts- und Verkehrswachstum zu beobachten war. Insbesondere mit Blick auf den Personenverkehr stellt sich daher die Frage, ob und inwiefern sich eine Stagnation oder ein Rückgang Verkehrsaufkommens auch bei steigender Konjunktur einstellen könnte.

Die stark zunehmende Elektrifizierung des MIV durch batterieelektrische Fahrzeuge (BEV) und Plug-in-Hybrid-Fahrzeuge (PHEV), mit einem Gesamtanteil von 1,2 % bzw. rund 590.000 Fahrzeugen am Pkw-Bestand (Stand: 01.01.2021), wird die damit verbundene Nachfrage nach elektrischer Energie im Straßenverkehr weiter deutlich erhöhen. Die Zahl der gegenwärtig in Deutschland zugelassenen Pkw mit H<sub>2</sub>-Brennstoffzellenantrieb (FCEV) ist demgegenüber mit rund 800 sehr gering [15]. Hierfür sind unterschiedliche Gründe, wie eine sehr knappe Auswahl an Serienfahrzeugen, ein sehr dünnes Tankstellennetz und im Vergleich zu BEVs und konventionellen Fahrzeugen hohe Anschaffungspreise, anzuführen. Vorteilhaft sind kürzere Betankungsdauern, geringes Speichergewicht und insbesondere eine Entkopplung von EE-Aufkommen und Nachfrage auch über längere Zeiten. Aus gegenwärtiger Sicht ist dennoch fraglich, ob FCEVs kurz- bis mittelfristig relevante Zulassungsanteile im Pkw-Massenmarkt erreichen werden.

Im Bereich der schweren Nutzfahrzeuge und (Omni-) Busse kommen bereits alternative Kraftstoffe und Antriebe, wie z. B. Erdgas (CNG/LNG), Hybridantriebe (z. B. in Form von Oberleitungs-Lkws (E-Highway) in Forschungs- und Entwicklungsprojekten) sowie batterieelektrische Antriebe (vor allem im ÖPNV) zum Einsatz.

Perspektivisch ist in diesem Fahrzeugsegment auch der Einsatz von H<sub>2</sub>-Brennstoffzellenantrieben denkbar, da die systembedingten Nachteile batterieelektrischer Antriebe (hohes Gewicht und Flächenbedarf der Batterien im Fahrzeug, Reichweite, Ladedauer) sich bei schweren Nutzfahrzeugen und Bussen stärker auf deren Nutzbarkeit auswirken als bei Pkws.

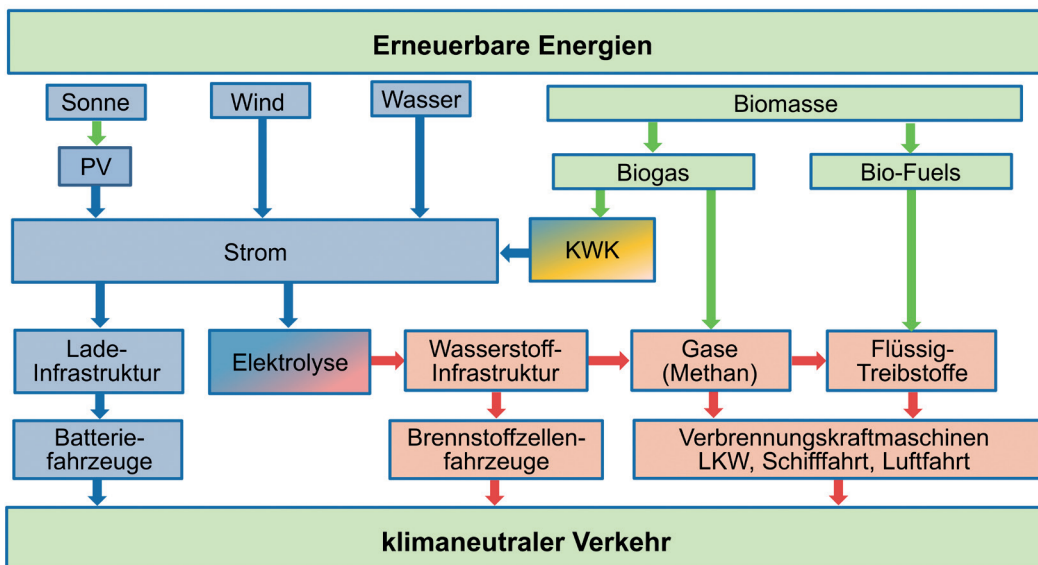


Abbildung 3: Systemdarstellung - Erneuerbare Energien und klimaneutraler Verkehr (eigene Darstellung)

Eine weitere Entwicklung im Verkehrssektor ist die Zunahme der mit dem Fahrrad zurückgelegten Wege, insbesondere im urbanen Raum. So ist in den deutschen Metropolen der Radverkehrsanteil zwischen 2002 und 2017 von 9 % auf 15 % gestiegen [16]. Auch in Regiopolen und Großstädten war eine Zunahme des Fahrradanteils von 2002 bis 2017 von 10 % auf 14 % zu verzeichnen [16]. In beiden Raumtypen entfielen 2017 5 % der Personenverkehrsleistung (Personenkilometer) auf das Fahrrad [17]. Sollte sich der Trend des zunehmenden Radverkehrs fortsetzen und es sich dabei nicht ausschließlich um zusätzliche Fahrten, sondern um den Ersatz von Fahrten mit dem MIV oder ÖPNV handeln, so könnte dies zu einem Absinken des Energieverbrauchs im straßengebundenen Kraftverkehr führen.

Die fortschreitende Digitalisierung in der Arbeitswelt, sowie die Maßnahmen zur Eindämmung der Corona-Pandemie haben zuletzt das mobile Arbeiten und die Arbeit im Home-Office deutlich verstärkt. Diese Entwicklungen führen dazu, dass Pendlerwege seltener zurückgelegt werden. Im Jahr 2017 arbeiteten beispielsweise 13 % der Arbeitnehmerinnen und Arbeitnehmer zumindest gelegentlich im Home-Office [18]. Im Frühjahr 2020 stieg diese Zahl in der Pandemie um ca. 25 % an [19]. Sollte sich dieser Trend fortsetzen und auch in Zeiten nach der Pandemie bestätigen, könnte sich die Reduktion der Pendlerwege in einem reduzierten Energieverbrauch und begünstigend für die Energiewende auswirken.

Darüber hinaus ermöglicht die Digitalisierung die Ausgestaltung neuer Kommunikationskonzepte zu Verkehrsangeboten durch digitale Mobilitätsplattformen. Diese schaffen durch die Verknüpfung einzelner Mobilitätsdienstleistungen durch technische Applikationen eine neue Grundlage für die Multimodalität der Nutzerinnen und Nutzer [20]. Daneben wird der ÖPNV im urbanen Raum verstärkt ausgebaut und genutzt. Dies führt zu einem erhöhten Verkehrsaufkommen durch Angebote des ÖPNV.

Die in den vergangenen Jahren vorwiegend im urbanen Raum stark gewachsenen Sharing-Angebote zahlreicher Anbieter umfassen u. a. (E-)Carsharing, Bike-Sharing, Ride-Sharing und Scooter-Sharing. Im Bereich des Carsharings sind vor allem flexible (free-floating) und stationäre Angebote sowie Flotten mit elektrisch und konventionell angetriebenen Fahrzeugen zu unterscheiden. Im Fokus des Carsharings steht hierbei unter dem Gesichtspunkt der Nachhaltigkeit zumeist die Einsparung bzw. Abschaffung von privaten Pkws zugunsten geteilter Fahrzeuge. Gleichermäßen relevant ist jedoch auch die Frage, welche Wege mit einem Sharing-Fahrzeug ersetzt oder ggfs. zusätzlich zu ansonsten mit dem ÖPNV, dem Rad, bzw. zu Fuß getätigten Wegen unternommen werden. Die Spanne der Ergebnisse zahlreicher Studien zum Carsharing ist zum Teil groß [21-23] und auf Grundlage unterschiedlicher Annahmen abgeleitet, sodass die tatsächlichen Effekte nur schwer zu verallgemeinern sind. Somit könnten Carsharing-Angebote den Energiebedarf im Straßenverkehr perspektivisch sowohl verringern als auch erhöhen.

Die Einführung automatisierter Fahrfunktionen in Kraftfahrzeugen, bis hin zum von zahlreichen Forschungs- und Entwicklungsprojekten [24] sowie Kraftfahrzeugherstellern angestrebten autonomen Fahren, bietet neue Perspektiven im Hinblick auf den bestehenden Straßenpersonenverkehr, birgt jedoch auch absehbare Herausforderungen. Der perspektivische Einsatz autonomer Fahrzeuge im Straßenpersonenverkehr ist sowohl im ÖPNV als auch im MIV denkbar. Die Bedeutung für den Straßenverkehr und Energiebedarf ist noch unklar, vor allem im Bereich privater Pkws könnten autonome Fahrzeuge jedoch neue Zielgruppen (z. B. Kinder, Senioren, Personen ohne Fahrerlaubnis) für das Autofahren „erschließen“ und somit zu seiner Attraktivitätssteigerung beitragen. Ginge man von einer Marktdiffusion dieser Technologie - vergleichbar mit vergangenen Innovationen im Kfz-Bereich - aus, so würde diese zu potenziellen weiteren Steigerungen der Verkehrsleistung und des Energiebedarfs im MIV beitragen.

Eine weitere Entwicklung im Verkehrssektor bildet die Verlagerung von MIV, Straßengüterverkehr und Personenflugverkehr (insbesondere Kurzstreckenflüge) auf die Schiene (ÖPNV, Regionalverkehr, Schienengüterverkehr, Schienenpersonenfernverkehr). Diese könnte perspektivisch insbesondere zu einer verringerten Nachfrage nach den bisher dominierenden, fossilen Kraftstoffen im Straßen- und Luftverkehr führen, jedoch absehbar zu einem Ansteigen des Energiebedarfs im Schienenverkehr.

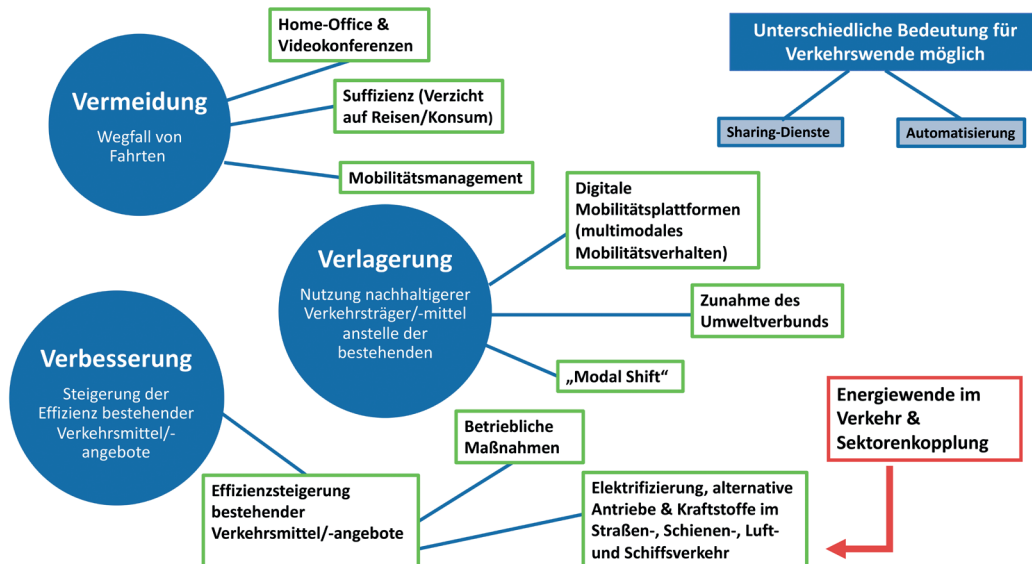


Abbildung 4: Säulen der Verkehrswende und Einordnung technischer Entwicklungen (eigene Darstellung)

Eine kurze Zusammenfassung der wesentlichen Entwicklungen im Verkehrssektor mit Auswirkungen auf die Energiewende:

- Die stark zunehmende Elektrifizierung im motorisierten Individualverkehr wird den elektrischen Energiebedarf des Straßenverkehrs erhöhen.
- Die Zunahme des Radverkehrs vor allem im urbanen Raum, sowie Home-Office für Arbeitnehmer\*innen kann den Energiebedarf des Straßenverkehrs senken.
- Sowohl Sharing-Angebote als auch die Automatisierung von Kraftfahrzeugen können den Energiebedarf perspektivisch sowohl verringern als auch erhöhen.
- Die Verlagerung anderer Verkehrsträger auf den Schienenverkehr kann zur Verringerung der Nachfrage fossiler Energie im Straßen- und Luftverkehr beitragen.

#### Politische und rechtliche Weichenstellungen der Verkehrswende

##### EU-Ebene

Die unter dem politischen Dach des „European Green Deal“ (hiernach: Green Deal<sup>1</sup>) erlassene „Europäische Strategie für nachhaltige und intelligente Mobilität“ (hiernach: Mobilitätsstrategie) wird die Verkehrswende in den europäischen Mitgliedstaaten in den nächsten Jahrzehnten durch ihre Zielsetzungen wesentlich prägen.

Bereits der Europäische Green Deal legt für den Verkehrssektor das Ziel fest, bis zum Jahr 2050 die Treibhausgasemissionen im Vergleich zu 1990 um 90 % zu senken [25]. Die Mobilitätsstrategie bekräftigt, dass der Erfolg des Green Deal von der Schaffung eines nachhaltigen Verkehrssystems abhängig ist [26].

Die Mobilitätsstrategie umfasst neben der Beschreibung umzusetzender Leitinitiativen (Bsp.: Leitinitiative 1: Förderung der Nutzung emissionsfreier Fahrzeuge und erneuerbarer CO<sub>2</sub>-armer Kraftstoffe sowie der Aufbau der dafür erforderlichen Infrastruktur [26]) auch festgesteckte Ziele für einzelne Verkehrsträger im Hinblick auf die Szenarien 2030, 2035 und 2050 [26]. Diese politischen Ziele haben keine regulatorische Wirkung und deren Nichteinhaltung ziehen keine Sanktionen nach sich.

Rechtlich bindend sind dagegen die in Art. 25 und Art. 26 der Richtlinie zur Förderung der Nutzung von Energie aus erneuerbaren Quellen (hiernach: EE-RiLi). Diese verpflichtet die Mitgliedstaaten zur Umsetzung verbindlicher Mindestanteile an erneuerbaren Energien im Verkehrssektor. Durch das „Fit für 55 % Paket“ der EU-Kommission soll das Ziel von zuletzt 14 % pro Mitgliedstaat bis 2030 im Som-

<sup>1</sup> Der Green Deal und die Mobilitätsstrategie legen politische Ziele zur Verkehrswende auf europäischer Ebene fest. Flankiert werden die politischen Zielsetzungen durch den rechtlichen Rahmen, beispielsweise mit der CVD, oder der AFID.



mer 2021 angehoben werden [27]. Unter den Voraussetzungen des Art. 27 Abs. 3 EE-RiLi wird auch Elektrizität aus erneuerbaren Anlagen, die für Straßenfahrzeuge bereitgestellt wird, als erneuerbare Energie für die Erfüllung der Mindestquote angerechnet.

Daneben wird der regulatorische Rahmen der Einbeziehung alternativer Kraftstoffe im Verkehr durch weitere europäische, wie die Clean-Vehicles-Directive (CVD) und die Richtlinie über den Aufbau der Infrastruktur für alternative Kraftstoffe (AFID), geprägt. In den nationalen Rechtsrahmen umgesetzt wurden die Richtlinien jeweils durch das Saubere Fahrzeuge Beschaffungsgesetz und die Ladesäulenverordnung.

### **Schnittstelle Sektorenkopplung: Gesteuertes Laden**

Die Mobilitätsstrategie zeigt auf, dass der europäische Markthochlauf von batterieelektrisch betriebenen Fahrzeugen die reibungslose Integration in das Stromnetz voraussetzt [26]. Hierbei kann Ladeinfrastruktur in Verbindung mit den BEVs dazu beitragen Flexibilität und Speicherkapazität für das Stromnetz bereitzustellen [27].

Das sog. gesteuerte Laden von batteriebetriebenen Fahrzeugen stellt eine Art der Kopplung von Energie- und Verkehrssektor dar, bei der der Ladevorgang „innerhalb der Standzeit eines Fahrzeugs verschoben werden kann“ [28]. Durch gesteuertes Laden können einerseits Lastspitzen umgangen und andererseits die Netzauslastung verbessert werden [28]. Erweitert werden kann dies aus technischer Sicht durch sog. Vehicle-to-Grid-Anwendungen (V2G), bei der die Batterien von Fahrzeugen auch als mobile Stromspeicher verwendet werden und dadurch einen Beitrag zur Netzstabilität leisten können [29]. Bei FCEVs ermöglicht die Nutzung von Wasserstoff, vorzugsweise erzeugt aus Strom erneuerbarer Quellen, dabei bereits die Entkopplung von Erzeugung und Bedarf, sofern die hierfür erforderlichen Elektrolyseure netzdienlich betrieben werden.

Es gilt folglich festzuhalten, dass durch die Möglichkeit des gesteuerten Ladens der Verkehrs- und Energiesektor in Zukunft besser verknüpft werden können.

### **1.3.2 Wärmewende**

Die Einhaltung der Klimaziele erfordert neben dem Ausbau der Stromerzeugung aus Erneuerbaren Energien auch signifikante Veränderungen in allen anderen Sektoren, insbesondere im Wärmesektor, um auch dort mit elektrischer Energie aus erneuerbaren Quellen die bisher eingesetzten fossilen Energieträger substituieren zu können.

Der gesamte Endenergieverbrauch in Deutschland betrug im Jahr 2018 etwa 2.500 TWh. Davon wurden im Wärmesektor mit 1.395 TWh (etwa 56 %) – also mehr als die Hälfte – benötigt [30], [31]. Darin enthalten sind etwa 65 TWh für die Bereitstellung von Kälte. Damit sollte die Dekarbonisierung des Wärmesektors eine der vorrangigsten Maßnahmen sein, um die im Rahmen der Energiewende gesetzten ehrgeizigen Ziele erreichen zu können. Der Anteil der Erneuerbaren Energien im Wärmesektor lag im Jahr 2019 nur bei etwa 15 % (180 TWh) [32]. Davon entfielen etwa 66 % auf biogene Festbrennstoffe, größtenteils eingesetzt im Haushaltsbereich, z. B. in Form von Pellets oder Scheitholz.

Begleitend zur Dekarbonisierung des Wärmesektors durch die Substitution fossiler Energieträger sind im Wärmesektor umfassende Maßnahmen zur Steigerung der Energieeffizienz in allen Bereichen (Wärmedämmung, Energierückgewinnung, Heizungssanierung, Prozessoptimierung ...) unabdingbar („Efficiency first“). Viele dieser Maßnahmen, wie z. B. die Gebäudesanierung, können jedoch nur langfristig umgesetzt werden. Während der spezifische Endenergieverbrauch zur Erzeugung von Raumwärme in privaten Haushalten zwischen 2008 und 2012 um etwa 14 % zurückging, ist er seitdem praktisch unverändert. Damit liegt Deutschland derzeit bei der Reduzierung des Gebäudeenergiebedarfs deutlich unter den für eine Zielerreichung erforderlichen Werten. Um die angestrebten CO<sub>2</sub>-Reduktionen erreichen zu können, sollten daher zunächst schnell umsetzbare Maßnahmen bevorzugt zur Anwendung kommen. Dabei werden sich insbesondere diejenigen Maßnahmen durchsetzen, die sich einerseits kostengünstig und ohne Systembruch in bestehende Systeme zur Wärmeerzeugung integrieren lassen und die andererseits aber gleichzeitig nicht durch Fehlanreize den Weg zu einer vollständig klimaneutralen Wärmeerzeugung als langfristiges Ziel blockieren (Lock-in-Effekt).

Die Optionen, die für eine Dekarbonisierung des Wärmesektors in Betracht kommen, sind in Abbildung 5 zusammengefasst:

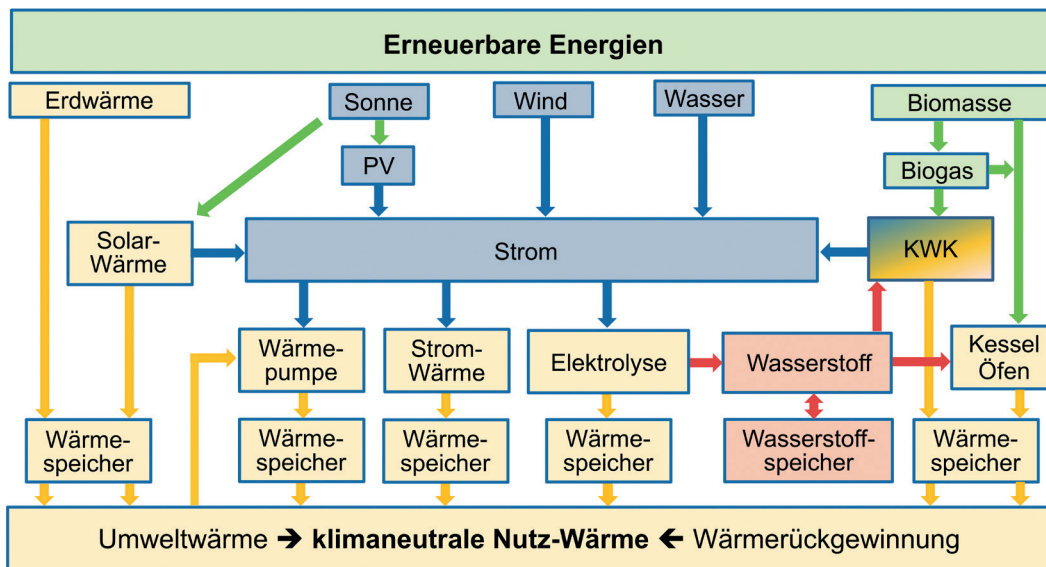


Abbildung 5: Die Wärmewende im Überblick (eigene Darstellung)

Es lässt sich also zusammenfassen:

- Der Wärmesektor stellt mit einem Anteil von heute etwa 56 % vom Endenergiebedarf den größten Hebel für eine Dekarbonisierung dar.
- Neben der Substitution fossiler Energieträger, sind parallel dazu Energieeinsparmaßnahmen mit hoher Dringlichkeit umzusetzen.

### Power-to-Heat Technologien

Unter Power-to-Heat werden alle Technologien verstanden, die Nutzwärme durch den Einsatz von Strom bereitstellen können. Dabei ist prinzipiell zwischen zwei unterschiedlichen Methoden zu unterscheiden:

- Systeme mit direkter elektrischer Wärmeerzeugung (reine Energieumwandlung)
- stromunterstützte Systeme zur Wärmerückgewinnung (insbesondere Wärmepumpen aber auch andere Wärmerückgewinnungssysteme mit Wärmetauschern)

Bei allen Systemen zur „Energieumwandlung“ sind die Umwandlungswirkungsgrade auf Werte unter 100 % begrenzt. Dies gilt prinzipiell auch für die Umwandlung von elektrischem Strom in Wärme. Während bei allen anderen Energiewandlern die Wirkungsgradverluste in Form von Wärme anfallen, die i. d. R. nicht genutzt wird, ist Wärme bei elektrischen Wärmeerzeugern die gewünschte Endenergie, die vollständig genutzt werden kann. Somit kann hier eine Umwandlung mit einer Effizienz von 100 % erreicht werden, wenn man die vorgelagerten Verluste im Stromnetz nicht mit einbezieht.

Während elektrische Widerstandsheizsysteme einen Nutzungsgrad des eingesetzten Stromes von quasi 100 % erreichen, kommen elektrische Wärmepumpen durch die zusätzliche Nutzbarmachung von Umweltwärme (Luft, Erdreich, Grundwasser oder Abwärme) auf ein Mehrfaches davon, abhängig von den jeweils gegebenen Randbedingungen. Neben einer sehr guten Wärmedämmung des Gebäudes als Voraussetzung, sollte eine Wärmepumpe bevorzugt mit einer Fußbodenheizung betrieben werden, da Wärmepumpen nur bei reduzierten Vorlauftemperaturen die gewünschte Effizienz erreichen. Da dies bei einer Heizungsumstellung in älteren Bestandsgebäuden üblicherweise mit hohem Zusatzaufwand verbunden ist, hat daher die Wärmepumpe dort bislang noch nicht den wünschenswerten Marktdurchbruch erreichen können. Derzeit befinden sich jedoch auch Wärmepumpen in der Entwicklung, die Wärme auf einem höheren Temperaturniveau bereitstellen können und somit auch einen Einsatz in Bestandsgebäuden ermöglichen sollen. Bei entsprechender Auslegung können Wärmepumpen in den Sommermonaten auch zur Gebäudekühlung eingesetzt werden.

Neben dem Einsatz dieser Power-to-Heat Technologien in dezentralen Einzel-Heizsystemen, werden zunehmend derartige Systeme auch zur Versorgung von Nah- und Fernwärmenetzen eingesetzt. Da-

bei kommen sowohl Widerstandsheizsysteme in Form von großen Strömungserhitzern (üblicherweise mit Leistungen bis in den einstelligen MW-Bereich) oder sog. Elektrodenkesseln (üblicherweise bei einem Leistungsbedarf von mehr als 10 MW) zum Einsatz, als auch Groß-Wärmepumpen, deren Leistungen inzwischen ebenfalls bis in den MW-Bereich reichen und unterschiedliche Temperaturbereiche (bis etwa 130 °C) abdecken können.

Außer den beschriebenen Anwendungen im Gebäudesektor werden auf dem Markt vielfältige strombasierte Systeme zur Bereitstellung von industrieller Prozesswärme in weiten Temperaturbereichen und für die unterschiedlichsten Anwendungen angeboten. Dabei sind auch hier Systeme von besonderem Interesse, die Abwärme aus anderen Prozessen nutzen können.

In Gebäuden, in denen eine Wärmepumpe aus genannten Gründen nicht zum Einsatz kommen kann, bieten sich zwei Lösungen an: Nicht-fossile Gase wie Biogas als Rohgas oder zu Biomethan aufbereitet oder nicht-fossile flüssige Brennstoffe, sogenannte Bio-Fuels.

Eine attraktive Option in dichter besiedelten Gebieten ist die Versorgung über Wärmenetze. Diese werden in Zukunft mit niedrigeren Temperaturen betrieben, um die Transportverluste zu reduzieren. Es ist auch denkbar, dass diese - im Gegensatz zu heute - aus verschiedenen dezentralen Wärmequellen wie Großwärmepumpen, Abwärme, KWK-Anlagen und tiefer Geothermie gespeist werden.

Mit grünen Brennstoffen betriebene KWK-Anlagen können flexibel eingesetzt werden, um Strom und Wärme zu erzeugen, wenn nicht genügend Strom aus Erneuerbaren Quellen zur Verfügung steht. Neben großen Warmwasserspeichern, vorwiegend als Tagesspeicher, kann Biogas hier einen wertvollen Beitrag zur Langzeit-Energiespeicherung leisten.

### **Weitere Optionen**

Der Vollständigkeit halber sollen auch solarthermische Kollektoren als Option zur Bereitstellung von EE-Wärme nicht unerwähnt bleiben. Diese werden üblicherweise im Haushaltssektor zur Warmwasserbereitung eingesetzt. Bei entsprechend größerer Dimensionierung können sie jedoch in den Übergangsmonaten auch zur Heizungsunterstützung eingesetzt werden. Der Marktanteil der Solarthermie ist in den letzten Jahren jedoch aufgrund der ständig fallenden Preise für PV-Module deutlich zurückgegangen. Üblicherweise sind diese Systeme nicht an ein Wärmenetz angeschlossen, sodass nicht-selbstgenutzte Energieanteile damit verloren gehen und bei Mangelsituationen ein alternativer Wärmeerzeuger einspringen muss.

### **Zeitliche Entkopplung von Dargebot und Bedarf**

Mit Ausnahme des Klimatisierungsbedarfs in den Sommermonaten, dürfte in den meisten Fällen das Dargebot von Strom aus erneuerbaren Quellen, insbesondere aus PV-Anlagen, mit dem Wärmebedarf nicht direkt korrelieren. Neben einer ausgewogenen Durchmischung von PV und Windenergie ist daher für eine Versorgung mit Wärmeenergie in der Regel eine Zwischenspeicherung erforderlich, entweder in Form eines Wärmespeichers oder als Brennstoffspeicher.

Wärmespeicher werden in den meisten Fällen als sog. Tagesspeicher ausgelegt, die Wärmeenergie für mehrere Stunden speichern können und somit den Wärmebedarf für Heizung und Trinkwassererwärmung innerhalb eines Tags abdecken können. Die dabei auftretenden Verluste sind gering und betragen nur wenige Prozent. Längere Speicherdauern sind möglich, würden aber insbesondere bei höheren Speichertemperaturen zusätzliche Aufwendungen bei der Wärmedämmung erfordern, um die Verluste zu begrenzen. Um die Verluste bei längerer Speicherdauer möglichst gering zu halten, werden daher auch große Wärmespeicher auf geringerem Temperaturniveau eingesetzt, z. B. Speicherseen, die dann als Wärmequelle in Verbindung mit Wärmepumpen genutzt werden können. Bei Gebäuden lässt sich auch die Wärmespeicherung in den thermischen Massen nutzen (direkt oder indirekt z.B. durch sog. Betonkernaktivierung), um Schwankungen der Raumtemperatur im Tagesverlauf zu begrenzen. Auch in vielen gewerblichen und industriellen Anwendungen lässt sich die thermische Trägheit der involvierten Massen als Energiespeicher nutzen.

Wärmenetze haben bereits eine intrinsische Speicherkapazität und können durch zusätzliche große Speicher ergänzt werden. In Fernwärmenetzen werden seit einigen Jahren vermehrt auch Großspeicher mit mehreren tausend Kubikmetern Speicherinhalt und Temperaturen über 100 °C eingesetzt.

Bei Brennstoffspeichern wird die Energie in Form von chemischer Energie gespeichert. Da hierbei praktisch keine Stand-by-Verluste auftreten, haben diese üblicherweise keine Begrenzung der Speicherdauer. Damit können derartige Speicher als Langzeitspeicher oder saisonale Speicher

eingesetzt werden, um längerfristige Perioden mit nicht ausreichender Verfügbarkeit von Strom aus erneuerbaren Quellen zu überbrücken. Bei der Nutzung synthetischer „grüner“ Brennstoffe fallen jedoch die bereits erwähnten Umwandlungsverluste an. Gasförmige Energieträger sind entweder in den Rohrleitungen eines Gasnetzes oder in zusätzlichen großen Gasspeichern gespeichert, z. B. in unterirdischen Kavernen. Flüssige Energieträger können bevorzugt lokal am Bedarfsort gespeichert werden. Auch biogene Festbrennstoffe (Holzpellets oder Scheitholz) sind chemische Energiespeicher und kommen als lokaler Energiespeicher in Frage.

So gilt es abschließend zu betonen das die direkte Nutzung von Strom im Wärmesektor (Power-to-Heat) ist sehr effizient. Zudem werden für die Entkopplung von EE-Dargebot und Wärmebedarf ggf. Speicher benötigt (Wärmespeicher oder stoffliche (chemische) Speicher).

## 1.4 Resultierende Energieverbräuche

Die oben beschriebenen Trends der Mobilitäts- und der Wärmende sowie weitere Faktoren beeinflussen die elektrische Spitzenlast, den Gesamtenergieverbrauch als auch den Stromverbrauch des Energiesystems der Zukunft. Viele Studien betrachten diese resultierenden Energieverbräuche. Abbildung 6 zeigt den sich in den unterschiedlichen Studien ergebenden Stromverbrauch in TWh pro Jahr.

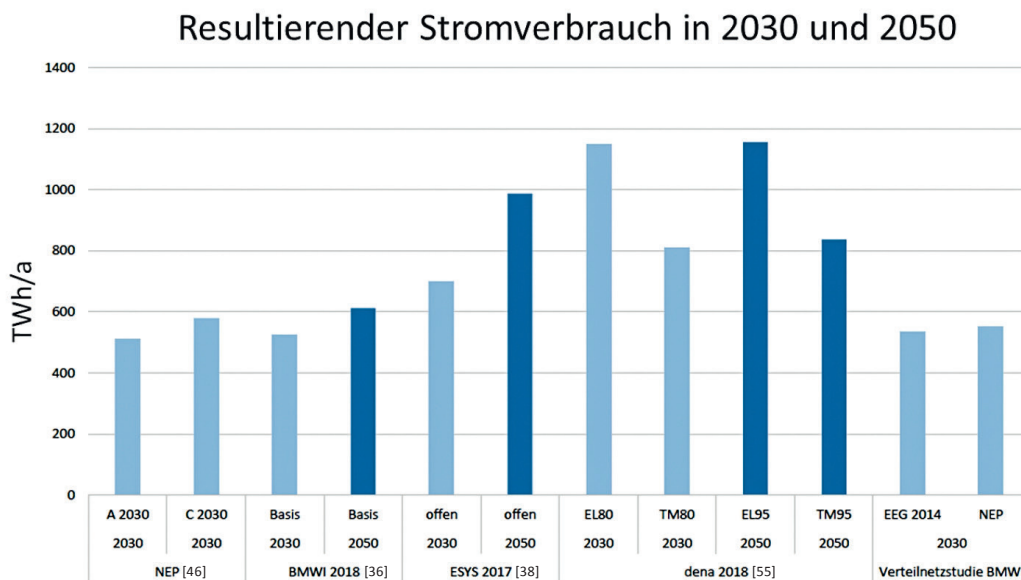


Abbildung 6: Vergleich des resultierenden Stromverbrauchs in 2030 und 2050 (Quelle: [33])

Die hohe Varianz der resultieren Stromverbräuche der ausgewählten Studien ist deutlich zu erkennen, wobei diese unabhängig vom betrachteten Zieljahr ist, da auch bereits die Abschätzungen für das 2030 weit auseinandergehen. So wird in der Studie des BMWi für 2030 ein Stromverbrauch von rund 550 TWh angenommen, in der Studie der Deutsche-Energie-Agentur (DENA) aus demselben Jahr ein doppelt so hoher Wert mit über 1.100 TWh für die Elektrifizierungsszenarien (EL). Die Varianz in den Studien und Szenarien ergibt sich aus unterschiedlichen Annahmen für verschiedene Einflussfaktoren. Da sich diese Faktoren überlagern, ist eine gesamtheitliche Abschätzung für 2050 und ein Vergleich der Studien und Szenarien auf dieser Ebene nur schwer möglich.

Abbildung 7 erläutert eine Auswahl an Einflussfaktoren, deren erwarteten Entwicklungen für die Zukunft sowie ihre Auswirkungen auf die zukünftige elektrische Spitzenlast, den zukünftigen Gesamtenergie- und Stromverbrauch.

Kategorie	Faktor	Erwartung	Elektrische Spitzenlast	Gesamtenergieverbrauch	Stromverbrauch
Bevölkerung	Einwohneranzahl	↗	↗	↗	↗
Mobilität - Verkehrsaufkommen	Personenverkehr	?			
	Güterverkehr	?	↗	?	↗
Mobilität - Technologien	Strom	↗	↗	↘	↗
	Wasserstoff	↗	=	↘	↗
	Power-Fuels	↗	=	↗	↗
	Fossile Kraftstoffe		=	↘	=
	Biogene Kraftstoffe	?	?	=	?
Wärme & Kälte - Bedarfe	Haushalte Wärme	↘ ↗	↗	?	↗
	Industrieprozesse	?	?	?	?
Wärme und Kälte - Technologien	Wärmepumpen	↗	↗	↘	↗
	Gasheizungen	↘	=	↘	=
	Ölheizungen	↓	=	↘	=
	Direktstrom	↗	↗	=	↗
	KWK	↗	↘	↗	↘
Großverbraucher	Zu- & Weggang	?			

↗ steigend    ↘ sinkend    = gleichbleibend    ? unklar

Abbildung 7: Erwartete Entwicklungen der Energieverbräuche und deren Faktoren (eigene Darstellung)

Wichtig zu beachten ist hierbei, dass ein Anstieg der Spitzenlast nicht zwangsläufig bedeutet, dass diese auch in einspeiseschwachen Zeiten gedeckt werden muss. Eine zunehmende Flexibilisierung der Last erfordert eine Unterscheidung zwischen Spitzenlast und der notwendig zu deckenden Last.

Weitere mögliche Entwicklungen, die für eine Bewertung der zukünftigen Energieverbräuche zu berücksichtigen sind:

- Prozessveränderungen in der Industrie zur Dekarbonisierung
- Digitalisierung/Künstliche Intelligenz (KI) zur gesteigerten Effizienz von Prozessen
- sonstige Elektrifizierung von Endkundenanwendungen
- Steigerung der Effizienz von Verbrauchern
- Neue Versorgungskonzepte durch Microgrids und Steigerung der Eigenverbrauchsquote
- Auswirkungen/Durchdringung von Flexibilitätsoptionen, z. B. Demand Side Management (Lastabschaltung, Lastverlagerung, Wechsel auf Eigenerzeugung)
- Speichernutzung ist eine Form der Lastverlagerung, durch Verluste erhöht sich die benötigte Energiemenge (Unterscheidung von Kurzfrist- und Langfristspeichern)
- Rebound Effekt - der teilweise Verlust an Wirksamkeit von erhöhter Energieeffizienz durch erhöhten Verbrauch [34]

Insgesamt kann festgehalten werden, dass durch Effizienzsteigerungen und durch die steigende Durchdringung effizienterer Technologien davon ausgegangen wird, dass der Gesamtenergiebedarf des Gesamtsystems sinken wird. Dies zeigen auch die ausgewählten Studien. Die Werte in den ausgewählten Szenarien und Studien sind in Abbildung 8 dargestellt.

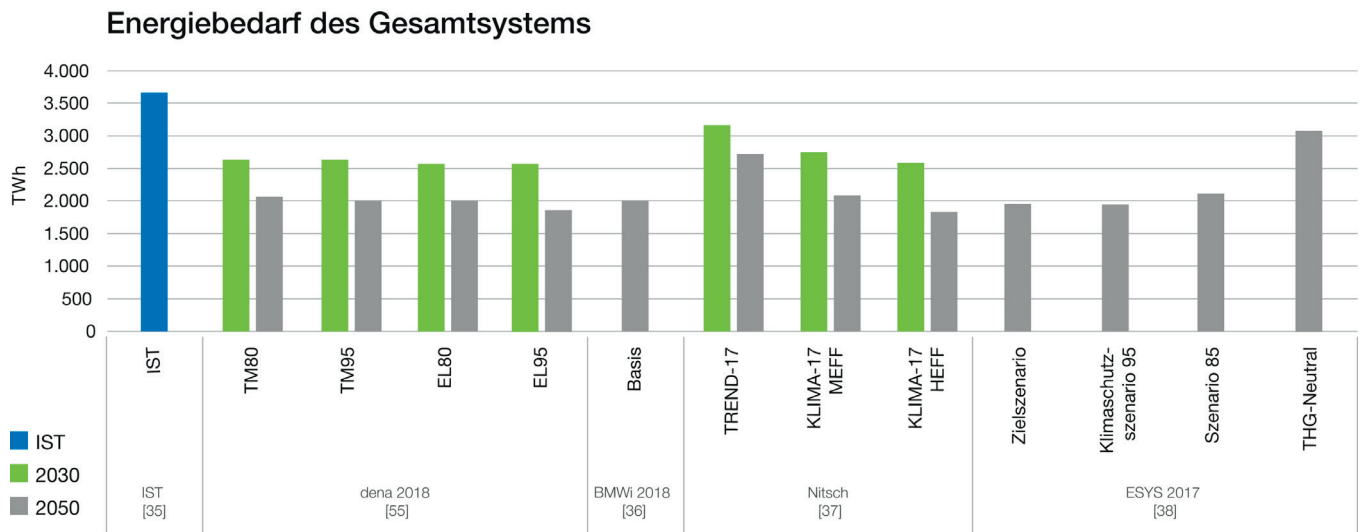


Abbildung 8: Energiebedarf des Gesamtsystems nach [35], [36], [37], [38]

Jedoch ist gleichzeitig durch die zunehmende Sektorenkopplung davon auszugehen, dass eine Vielzahl von Anwendungen in Zukunft "elektrifiziert" wird und somit trotz sinkendem Gesamtenergiebedarf der elektrische Strombedarf im Vergleich zu heute steigen wird. Eine genauere Betrachtung hierzu erfolgt im nachfolgenden Abschnitt 1.5. Durch den Umstieg von Anwendungen hin zu elektrischer Energie kann eine gesamtheitliche Bewertung der Energiewende nur über den CO<sub>2</sub>-Fußabdruck erfolgen.

## 1.5 Integrierte Energieversorgung

Historisch waren fossile Energieträger die primäre Energiequelle für alle Sektoren, die nur schwach gekoppelt funktionierten. Dieses historisch schwach gekoppelte System auf Basis fossiler Ressourcen veranschaulicht Abbildung 9.

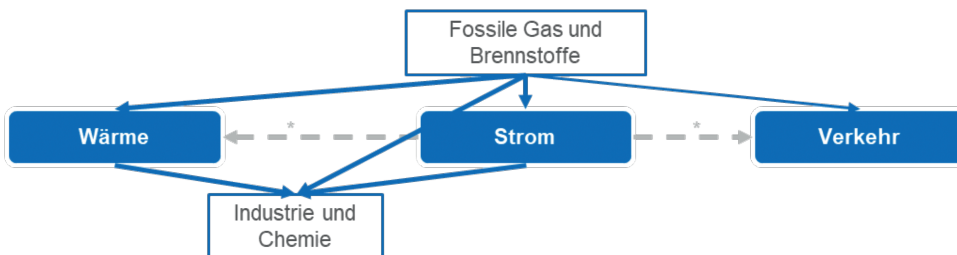


Abbildung 9: Historisch schwach gekoppeltes System auf Basis fossiler Ressourcen (eigene Darstellung)

Dabei wurden zur Strom- und Wärmeerzeugung hauptsächlich Kohle und Gas und im Mobilitätssektor hauptsächlich Diesel, Benzin, Gas und Kerosin verwendet. Um einen aktiven Klimaschutz zu gewährleisten, müssen fossile Energieträger durch Erneuerbare Energien ersetzt werden. Diese Transformation haben wir in Deutschland bereits ambitioniert durch die Implementierung der in Kapitel 1.3.1 erörterten Richtlinien gestartet. Jedoch werden Erneuerbare Energien derzeit primär im Stromsektor genutzt (Photovoltaik, Windenergie, Geothermie, Wasserkraft). Geringfügig finden sie auch Einsatz in der Wärmeversorgung (Biomasse, Geothermie, Solarthermie).

Um alle Sektoren dekarbonisieren zu können, ist zwangsläufig eine Nutzung der Erneuerbaren Energien in allen Sektoren und somit eine Sektorenkopplung notwendig. Dies ist zum einen über eine direkte Elektrifizierung - im Folgenden **direkte Sektorenkopplung** genannt - sowie über die Umwandlung von Strom auf Basis von Erneuerbaren Energien in andere Energieträger - im folgenden **indirekte Sektorenkopplung** genannt- möglich. Die direkte und indirekte Sektorenkopplung ist in Abbildung 10 dargestellt.

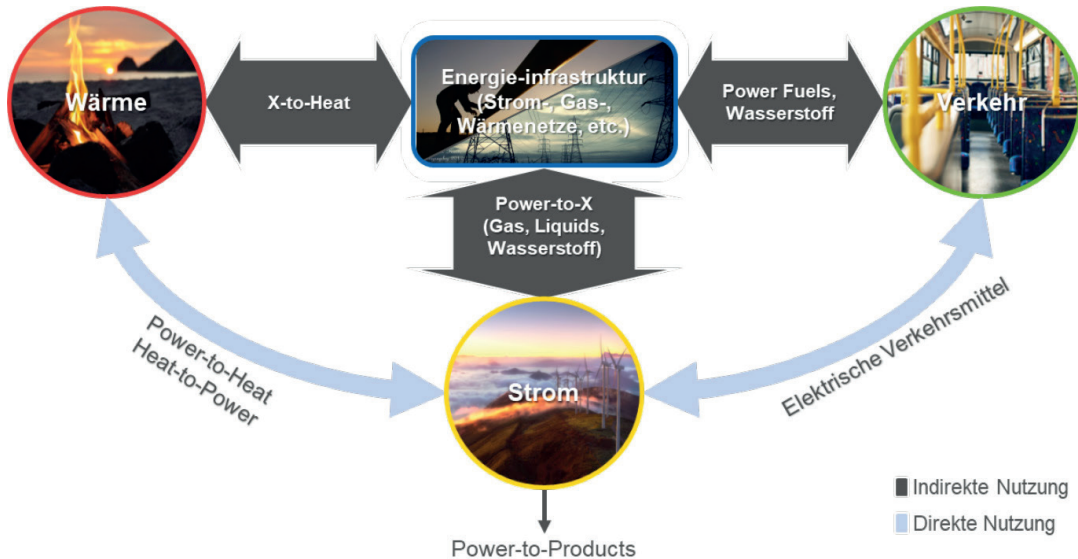


Abbildung 10: Direkte und indirekte Sektorkopplung (eigene Darstellung)

Die Sektorkopplung bedarf folglich einer gesamtheitlichen Betrachtung aller Energieformen. Dies bedeutet, dass die jeweiligen Infrastrukturen integriert geplant, aneinander angepasst und gemeinsam betrieben werden müssen.

Die Dargebotsabhängigkeit von Erneuerbaren Energien erzeugt einen großen Bedarf an Flexibilität, z. B. Speichermöglichkeiten, für eine möglichst umfangreiche Nutzung volatiler Erneuerbarer Energien, wie Wind und Photovoltaik. Da elektrische Speichermöglichkeiten aufgrund der häufig fehlenden Wirtschaftlichkeit (noch) nicht im großen Maß zur Verfügung stehen, bietet die Sektorkopplung über die Umwandlung der Energie in andere Energieformen die Möglichkeit Flexibilität ins System zu bringen. Auch in anderen Energieformen bieten sich vielfältige Speichermöglichkeiten, um das volatile Dargebot vom Bedarf zu entkoppeln.

### Sektorkopplung

Die Sektorkopplung bietet die Möglichkeit für eine emissionsarme oder emissionsfreie Energieversorgung durch direkte Elektrifizierung sowie durch die indirekte Nutzung von Erneuerbaren Energien.

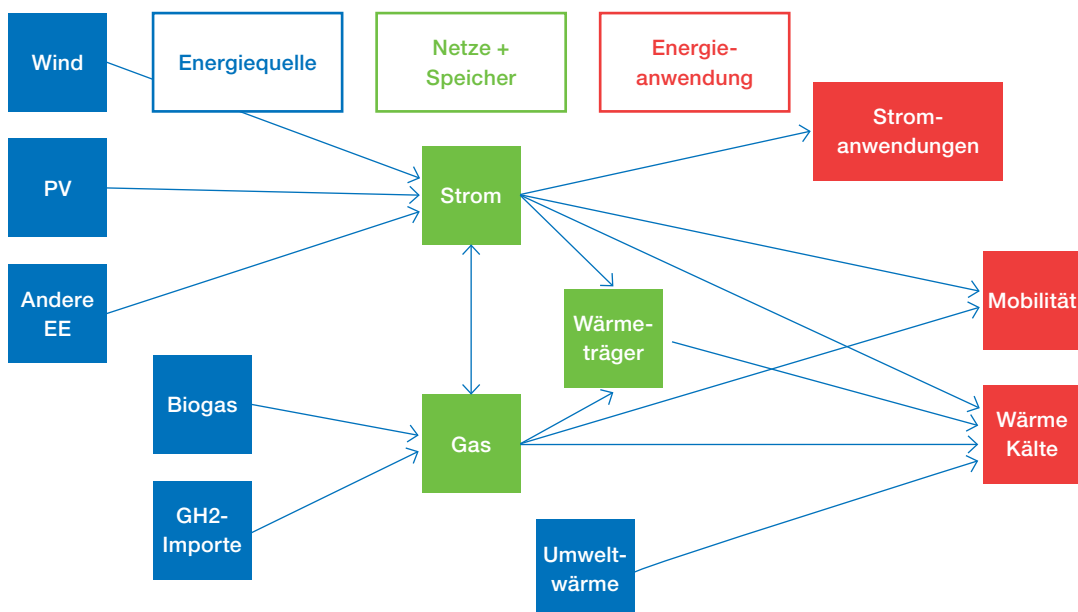


Abbildung 11: Energiequellen, -träger und -anwendungen in einer sektorgekoppelten Zukunft (eigene Darstellung)

Abbildung 11 zeigt, dass durch Energiewandlung, Netze und Speicher für Elektrizität, Wärme, und Gas sämtliche Energieanwendungen technisch von erneuerbaren Energiequellen gespeist werden können. Es wird somit ersichtlich, dass die Sektorenkopplung umso wichtiger wird, je höher die Klimaschutzziele gesteckt werden. Die Sektorenkopplung ermöglicht, die Nutzung der Erneuerbaren Energien wirtschaftlich zu optimieren, da es die Sektorenkopplung – als flexible Last – ermöglicht, den Verbrauch an das volatile Dargebot von Erneuerbaren Energien anzupassen. Sektorenkoppelnde Technologien sind daher sowohl ein wesentlicher Treiber für die Stromnachfrage in der Zukunft als auch die Möglichkeit der Flexibilisierung der Last.

Wie eingangs erwähnt ist die effizienteste Sektorenkopplung aufgrund geringer Umwandlungsverluste die direkte Nutzung von Strom aus Erneuerbaren Energien, der beispielsweise im Haushalt durch Photovoltaik erzeugt werden kann. Bei der direkten Elektrifizierung werden Anwendungen aus allen Sektoren mit Strom betrieben. Durch die Nutzung von Energiespeichern (Wärme-, Batteriespeicher, etc.) kann die direkte Nutzung möglichst weit ausgebaut werden.

Bei einer fortgeschrittenen Sektorenkopplung ist eine direkte Elektrifizierung in den Sektoren Wärme und Verkehr nicht für alle Anwendungen, zu jedem Zeitpunkt oder flächendeckend möglich oder wirtschaftlich sinnvoll. Daher lohnt sich außerdem die indirekte Nutzung über andere Energieträger auf Basis von Erneuerbaren Energien (indirekte Sektorenkopplung). Dabei wird im ersten Schritt aus elektrischer Energie mittels Elektrolyseure Wasserstoff erzeugt, welcher optional in weiteren chemischen Prozessen zu Methan, Kerosin, Diesel oder weiteren Produkten umgewandelt werden kann. Diese können dann in allen Sektoren als Energie- oder Rohstoffquelle genutzt werden, z. B.:

- Strom- und Wärmeerzeugung über Brennstoffzellen, GuD, KWK
- Wärmeerzeugung über Verbrennung synthetischer Brennstoffe
- Mobilität über Brennstoffzellen-, Gas- und Dieselfahrzeuge, Schiffe, Flugzeuge
- Dekarbonisierung von Industrieprozessen (z. B. Stahlherstellung)
- Bereitstellung von Chemierohstoffen als Ersatz von fossilen Energierohstoffen

Diese synthetischen Energieträger können im Vergleich zu Strom relativ einfach und vergleichsweise kostengünstig insbesondere für längere Zeiträume eingespeichert werden und bieten hier Vorteile gegenüber der direkten Speicherung von Strom in Batterien. Durch diesen hohen Flexibilitätsgrad der indirekten Nutzung ist der gegenüber direkter Nutzung schlechtere Wirkungsgrad ggf. weniger relevant. Das volatile Erneuerbare Energieangebot lässt sich durch die indirekte Sektorenkopplung auch längerfristig (z. B. saisonal) ausgleichen. Prinzipiell könnten dadurch die zur Verfügung stehenden Erneuerbaren Energien bei Überschüssen besser genutzt werden, vorausgesetzt, die Elektrolyseure könnten zu wirtschaftlichen Konditionen fluktuierend und mit geringen Volllaststunden betrieben werden.

Da die Energie für die Sektorenkopplung durch erneuerbare Energieerzeuger bereitgestellt wird, ist zunächst ein massiver Zubau dieser Anlagen notwendig. Die Menge des auf Basis von Erneuerbaren Energien inländisch erzeugten Stroms, der in andere grüne Energieträger umgewandelt wird, unterscheidet sich je nach THG-Emission-Reduktionsziel, aber auch durch den angenommenen Grad der direkten Elektrifizierung. Diese Varianz in den Studien ist in Abbildung 12 dargestellt.



## Inländischer Strombedarf für indirekte Sektorenkopplung in 2050

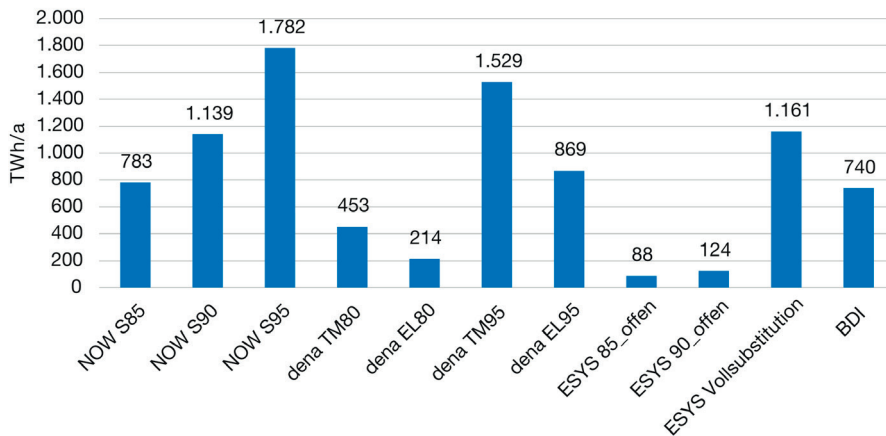


Abbildung 12: Vergleich des inländischen Strombedarfs für indirekte Sektorenkopplung in 2050 (eigene Darstellung) Hinweis zur ESYS-Studie: Heutige Erdgas-, Wasserstoff- und PKW-Mobilitätsbedarfe werden voll durch synthetischen Wasserstoffe substituiert.

Zusätzlich bietet der Import durch internationalen Handel von Wasserstoff-Erzeugnissen auf Basis von Erneuerbaren Energien eine weitere Option. Im Hinblick auf die Frage zur Herkunft des Wasserstoffs sind sich heutige Studien uneinig (Abbildung 13). Es gibt Studien, die annehmen, dass der gesamte Wasserstoffbedarf in Deutschland durch inländische Produktion erzeugt wird. Andere Studien wiederum gehen davon aus, dass Wasserstoff und die daraus abgeleiteten sogenannten Power Fuels international gehandelt werden. Dadurch ließen sich auch Standorte nutzen, die günstigere Konditionen für die Nutzung von Erneuerbaren Energien haben, z. B. Nordafrika. Für Deutschland können somit auch in Zukunft Importe von z. B. Wasserstoff eine zentrale Rolle spielen. Dabei sind Fragen zum Transportmedium und zu den Transportkosten weitgehend ungeklärt. Grundsätzlich ist für eine nachhaltige Lösung wichtig, dass eine Wasserstoffherzeugung im Ausland nicht zu einer Steigerung der Treibhausgasemissionen anderswo führt. Dies muss durch entsprechende Zertifikate („grüner Wasserstoff“) nachgewiesen werden. Des Weiteren stellt sich die Frage, wie abhängig die deutsche Energieversorgung von anderen Ländern sein sollte.

## Import synthetischer Energieträger

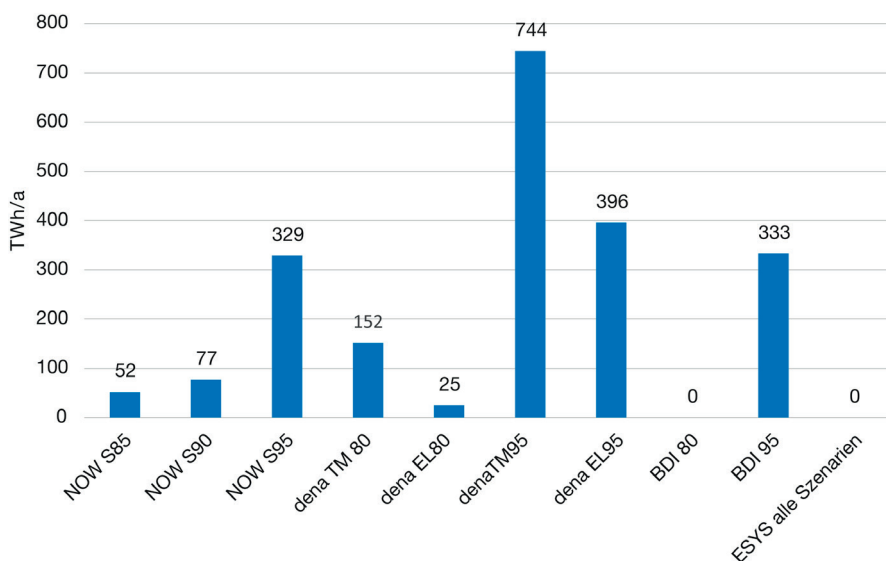


Abbildung 13: Vergleich des Importbedarfs synthetischer Energieträger (eigene Darstellung)

Aktuell sind die Rahmenbedingungen für wirtschaftliche Geschäftsmodelle für jegliche Art der Sektorenkopplung in der Regel nicht geeignet. Diese müssen für eine Skalierung der Sektorenkopplung angepasst werden. Für die Hochlaufphase kann eine staatliche Subventionierung notwendig sein. Ausführlichere Analysen zu Geschäftsmodellen befinden sich in Kapitel 2.

Durch diese integrierte Energieversorgung über Sektoren hinweg sowie durch die klimaneutrale Energieerzeugung werden sich die anderen Anforderungen an die hierfür notwendige Energieinfrastruktur weiter wandeln. Daraus resultiert ein hoher Investitionsbedarf für den Umbau der Energieinfrastruktur:

- Erneuerbare Erzeugung in industriearmen Regionen ohne große Lasten führt zu höherem Transportbedarf im Stromübertragungsnetz (Wind im Norden, Industrie im Süden).
- Erneuerbare Erzeugung führt zu Energieflussänderungen in Stromverteilnetzen bis hin zu einer Flussumkehrung.
- Die Verschiebung von Bedarfen im Mobilitäts- und Wärmesektor in den Stromsektor führt zu höheren Energiemengen und Leistungsspitzen im Stromnetz (siehe Abschnitt 1.4).
- Elektrolyseure beeinflussen je nach Standort die Auslastung der Strom- und Gasnetze.
- Der Einsatz von Wasserstoff bedarf einer Umrüstung der Gasinfrastruktur.
- Wärmenetze werden heute durch eine zentrale Wärmequelle meist auf Basis von fossilen Energieträgern betrieben. Zukünftig bieten dezentrale Wärmeerzeugung und Niedertemperatur-Wärmenetze nachhaltige Lösungen und gleichzeitig implizite Flexibilität für das Gesamtsystem (siehe Abschnitt 1.3.2).

## 2 Marktstruktur und -teilnehmende im Energiehandel der Zukunft

Mit der Transformation des Energiesystems wird sich auch der Energiehandel verändern. In diesem wird bis 2050 die Bedeutung des Handels mit Strom oder strombasierten Energieträgern signifikant zunehmen. Treibende Trends im Rahmen der Dekarbonisierung sind vor allem die Elektrifizierung von Prozessen in allen Sektoren sowie die zunehmende Kopplung dieser.

Nach einer kurzen Betrachtung neuer Märkte für physisch gebundene Energieformen wird der Fokus in diesem Abschnitt auf dem Handel mit Strom oder strombasierten Energieträgern, Leistungen und Flexibilitätsoptionen liegen. Für diese wird dargestellt welche Güter an welchen Handelsplätzen durch welche Akteure gehandelt werden könnten.

### 2.1 Handelsgüter 2050

#### 2.1.1 Physisch gebundene Energien

Analog zum heutigen Gas-, Öl- und Benzinhandel werden sich Märkte für erneuerbare, physisch gebundene Energieformen ausbilden. Dieses umfasst sowohl Märkte für Wasserstoff und synthetische Gase, wie erneuerbares Methan, sowie für synthetische Flüssigkraftstoffe, sogenannte E-Fuels, oder auch biogene Energieträger.

Bei den erneuerbaren Energieformen existieren im Gegensatz zu fossilen Energieträgern keine begrenzten Reserven mit initialer Verteilung. Somit wird es bei den Märkten für erneuerbare Energieprodukte im Gegensatz zum Handel mit dem aktuell wichtigsten Energieträger Öl, welcher im Jahr 2019 rund ein Drittel des globalen Primärenergieverbrauchs ausmachte [39, S. 9], angebotsseitig keine natürliche Oligopolstellung geben. Der dadurch entstehende Wettbewerb schafft Anreize diese Energieformen möglichst preiswert zur Verfügung zu stellen, welches ein Innovationstreiber für effizientere Technologien sein kann.

Über die detaillierte Regulierung und Ausgestaltung dieser Märkte sowie die Preise lassen sich wegen der Vielzahl an Einflussfaktoren und Szenarien keine verlässlichen Vorhersagen treffen. Ferner ist es unklar in welchem Maße die Preise dieser Energieträger standortabhängig sein werden.

#### 2.1.2 Elektrische Energie und Flexibilitätsoptionen

Im Energiesystem der Zukunft wird der Preis gehandelter elektrischer Energie und Leistung stark von Faktoren abhängen, die im konventionellen Energiesystemen kaum oder keinerlei Relevanz haben.

Wie in Abschnitt 1.5 beschrieben wurde, ist der Einsatz von Flexibilitätsoptionen zur Wahrung der Stabilität des transformierten elektrischen Systems notwendig. Die Höhe des nutzbaren Flexibilitätspotentials auf der Verbraucherseite wird durch Studien übereinstimmend im zweistelligen Gigawatt-Bereich eingeschätzt, wie in Abbildung 14 dargestellt ist. Das größte kumulierte Lastverschiebungspotential liegt im Vergleich der Sektoren im Bereich privater Haushalte. Dieses ist jedoch wegen der geringen Anreizhöhe für die Einzelverbraucher und der hohen Anzahl an Akteuren am schwierigsten zu aktivieren [40].

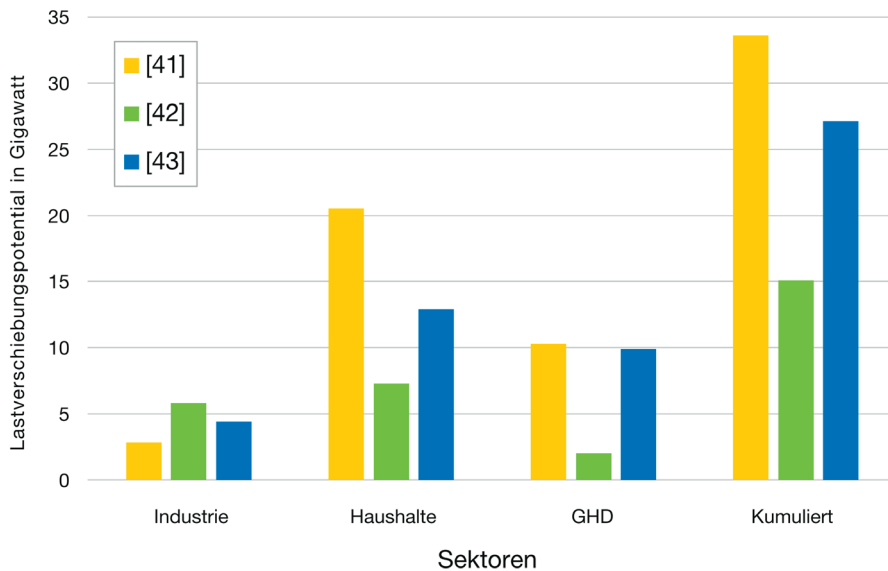


Abbildung 14: Höhe des Lastverschiebungspotenzials in Deutschland kumuliert und aufgeteilt auf die Sektoren Industrie, Haushalte sowie Gewerbe, Handel und Dienstleistungen (GHD) [41–43] (Quelle: [44])

Das Dargebot elektrischer Energie und somit die Börsenpreise werden mit dem zunehmenden Anteil an volatiler erneuerbarer Erzeugung zunehmenden Schwankungen unterliegen. Dabei wird es sowohl kurzfristige Schwankungen in der Größenordnung Minuten oder Stunden als auch langfristige Schwankungen in der Größenordnung mehrerer Tage geben. Sich hierbei ergebende kurzfristige Preisdifferenzen werden von flexiblen Erzeugern und Verbrauchern zur wirtschaftlichen Betriebsoptimierung genutzt werden, indem im großen Maß mit Flexibilitätsoptionen gehandelt werden wird. Mit der steigenden Abhängigkeit des Strompreises vom Zeitpunkt, erhöht sich zunehmend der Wettbewerbsvorteil von flexiblen Erzeugern, Verbrauchern und Prosumern gegenüber inflexiblen Akteuren.

Bei der Umsetzung einiger Konzepte wird neben dem Zeitpunkt auch der Ort einen Einfluss auf den Wert gehandelter Energie und Leistung haben. Konzepte, bei denen dieses zutrifft, sind unter anderem Zellulare Energiesysteme oder lokale Flexibilitätsmärkte.

## 2.2 Handelsplätze und Kontraktformen für elektrische Energie

Das Spektrum an Möglichkeiten elektrische Energie und Leistung zu handeln ist im Energiesystem der Zukunft breiter als heute. Bestehende Handlungsoptionen werden sich verändern sowie neue Handelsplätze und Vertragsarten hinzukommen. Dabei werden parallel zwei auf den ersten Blick gegensätzliche Trends beobachtbar sein. Zum einen wird es ein räumliches und sektorielles Zusammenwachsen der Energiebinnenmärkte geben. Zum anderen entstehen neue sektorenspezifische und regionale Handlungsoptionen.

Durch regionale markt- und netzentgeltbasierte Anreize wird der Ausbau von regionalen Erneuerbaren Energieerzeugern und von Flexibilitätsoptionen auf den Netzausbau abgestimmt. Folglich wird der benötigte physische Netzausbau reduziert, sodass die volkswirtschaftlichen Kosten der Energiewende signifikant sinken [45]. Ferner haben im Energiehandel der Zukunft kleinere Akteure mehr Freiheiten und wirtschaftliche Optimierungspotentiale, welches die Akzeptanz der Energiewende erhöhen und diese somit beschleunigen kann.

Im Folgenden werden die wichtigsten Handelsplätze und Vertragsarten skizziert, bevor im Abschnitt 2.3 auf die Akteure im Energiehandel eingegangen wird.

### 2.2.1 Strombörsen

Die großen Strombörsen werden 2050 Teil eines möglichst freizügigen und sektorenübergreifenden Energiebinnenmarkts innerhalb der EU sein. Durch eine Stärkung des Wettbewerbs soll den Verbrauchern der Zugang zu möglichst kostengünstiger Energie ermöglicht werden [46].

Um dieses zu gewährleisten, wird sich der heute bereits sichtbare Trend fortsetzen, kleinteiligere Energie- und Leistungsmengen handeln zu können. Dieses ermöglicht es kleineren Akteuren an den

Strombörsen zu partizipieren, sodass sich die Anzahl der Akteure deutlich erhöhen wird. Ferner ist zu erwarten, dass ebenso der Trend zu einem immer kurzfristigeren Handel anhalten wird. Mit der vollständigen Durchdringung von Informations- und Kommunikationstechnologien in der Energiebranche rückt der letztmögliche Handelszeitpunkt so nah wie technisch möglich an den Erbringungszeitpunkt heran.

### 2.2.2 Dynamische Stromtarife

Verbraucher und Prosumer werden durch dynamische Stromtarife auch ohne direkte Partizipation am Energiebinnenmarkt von dessen innertäglichen Preisdifferenzen profitieren. Über Dienstleister können sie die Flexibilitätsoptionen ihrer Assets komfortabel vermarkten lassen. Die entsprechende Ansteuerung der Anlagen erfolgt automatisiert. Flexibilitätsoptionen mit einem Prognosehorizont in der Größenordnung eines Tages können durch den Dienstleister zur dynamischen Strombeschaffung eingesetzt werden. Kurzfristig plan- oder verfügbare Flexibilitätsoptionen können im kontinuierlichen Intraday Handel angeboten werden. Die entstehenden wirtschaftlichen Vorteile werden anteilig an den Kunden weitergeleitet. Hierbei gilt, je flexibler sich der Kunde zeigt, desto geringere Strombezugs-kosten wird er haben. Die Randbedingungen, welche seiner Assets zu welchem Zeitpunkt flexibel eingesetzt werden können, kann der Kunde frei definieren.

### 2.2.3 Power Purchase Agreement (PPA)

Power Purchase Agreements (PPA) sind Stromlieferverträge zwischen zwei Parteien. Die Vertragspartner bei diesen meist langfristigen Kontrakten sind in der Regel ein Produzent Erneuerbaren Stroms und ein Abnehmer. Dabei sind die Konditionen eines PPA weitestgehend frei verhandelbar, sodass der Vertrag viele Formen annehmen kann.

Aus der Langfristigkeit der PPAs leitet sich Planungssicherheit und somit die Attraktivität dieser Art von Geschäftsbeziehung ab. Mit der kalkulatorischen Sicherheit können beispielsweise erneuerbare Erzeugungsanlagen finanziert werden. Beide Vertragspartner können im Betrieb Marktpreisrisiken durch stabile Preise minimieren.

Bei Corporate PPAs ist der Stromabnehmer ein verbrauchendes Unternehmen; alternativ können bei Merchant PPAs Stromhändler bzw. Dienstleister die Energie abnehmen. Ferner wird zwischen On-Site PPAs und Off-Site PPAs unterschieden. Bei ersteren findet eine direkte physische Strombelieferung statt, bei letzterem eine rein bilanzielle. Zusätzlich wird es auch Mischformen mit zwischengeschaltetem Dienstleister sowie Kombinationen mit anderen Handlungsoptionen geben.

### 2.2.4 Peer-2-Peer Handel (P2P)

Beim Peer-2-Peer Handel handeln mehrere gleichberechtigte Akteure, bevorzugt Prosumer, elektrische Energie beziehungsweise Leistung in einem regionalen Umfeld direkt untereinander. Beispiels-halber können Betreiber dezentraler Erzeugungsanlagen über Peer-2-Peer Verträge Strom „tauschen“ oder an Abnehmer verkaufen. Im Vordergrund steht dabei der lokale oder regionale Aspekt, um den benötigten physischen Netzausbau zu reduzieren [45]. Beispielsweise könnten die Vertragspartner lokal im selben Haus wohnen oder regional im selben Verteilnetz angeschlossen sein. Im Bereich Peer-2-Peer Direktverträge gibt es heute bereits verschiedene Ausgestaltungen.

### 2.2.5 Regionale Flexibilitätsmärkte

Regionale Flexibilitätsmärkte sind lokale und regionale Handelsplattformen auf welchen Flexibilitäts- optionen als Dienstleistung angeboten werden können. Nach heutigen Konzepten werden sie in der Regel von Verteilungsnetzbetreibern betrieben. Diese können drohende Netzengpässe präventiv beheben, indem sie von den Marktteilnehmern angebotene Flexibilitätsoptionen kaufen und abrufen. Auf diese Weise können Situationen, mit gefährdeter Netzstabilität vermieden und der benötigte phy- sische Netzausbau im Rahmen der Energiewende reduziert werden [47].

## 2.3 Akteure im Energiehandel

In der klassischen Energiewirtschaft gibt es die vier Wertschöpfungsstufen Erzeugung, Übertragung, Verteilung und Verbrauch, denen eindeutig die Unternehmen der Energiebranche zugeordnet werden können. Eine Übersicht der Akteure und deren Verknüpfungen ist in Abbildung 15 dargestellt. In die- sem System haben Endkunden in aller Regel ausschließlich mit einem Energieversorger einen Vertrag über Belieferung zu einem starren Strompreis.

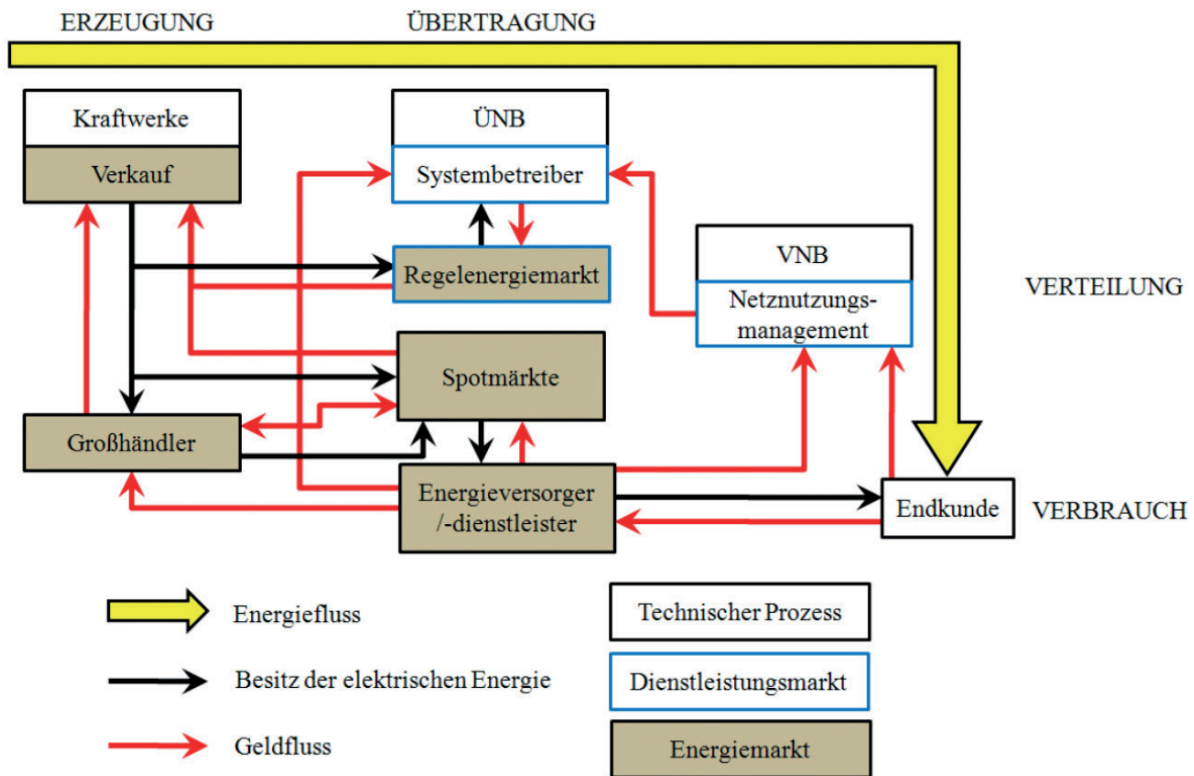


Abbildung 15: Rollen im konventionellen deutschen Elektrizitätsmarkt (eigene Darstellung nach [48, S. 111])

Auf dem Weg ins Energiesystem der Zukunft findet eine Veränderung und Diversifizierung der Akteure im Energiehandel statt. Durch den Wegfall der zentralen Erzeugung und unidirektionalen Verteilung elektrischer Energien verliert sich die zentrale Position der heutigen großen Erzeuger. Die klar abgegrenzten Rollen entlang der Wertschöpfungskette verschwimmen bereits heute.

Im Folgenden werden einige Akteure des Energiehandels der Zukunft beschrieben. Am Ende dieses Kapitels werden diese und die zuvor vorgestellten Handlungsoptionen in Abbildung 16 in einer Matrix zusammengefasst.

### 2.3.1 Moderne Energiedienstleister

Energiedienstleister der Zukunft bieten Dienstleistungen an, die sich über mehrere Stufen der Wertschöpfungskette erstrecken. Sie verwalten unter anderem virtuelle Kraftwerke bestehend aus kumulierten Erzeugern, Verbrauchern und Prosumern. Dabei binden sie Assets anderer Eigentümer, sprich ihrer Kunden, aktiv in ihre Betriebssteuerung ein [49].

Wie in Abschnitt 2.2.2 dargestellt können sie eine dynamische Strombeschaffung durchführen oder mit den Flexibilitätsoptionen ihrer Kunden kurzfristig handeln und so den Kunden einen dynamischen Stromtarif anbieten. Dabei werden sich Dienstleister durchsetzen, die dem Kunden den besten Komfort in Bezug auf Freiheit und Bedienbarkeit anbieten.

Ferner wird es Dienstleister geben, die Plattformen für die Organisation und Verwaltung von Peer-2-Peer-Handelsbeziehungen anbieten oder regionale Flexibilitätsmärkte organisieren und betreiben.

Es ist zu erwarten, dass Konzerne bislang energiefremder Branchen, die eine große Anzahl an Assets besitzen oder betreuen, als Energiedienstleister agieren werden. Beispiele hierfür sind Mobilitätsanbieter oder Immobilienfirmen.

### 2.3.2 Industrielle Prosumer

Auf Grund des Wettbewerbsdrucks werden industrielle Unternehmen und Konzerne ihre Prozesse bis zum Jahr 2050 soweit wie möglich flexibilisiert haben. Bereits heute sollte der Aspekt eines möglichen flexiblen Betriebs in die Planung aller Prozesse eingehen.

Ferner werden Unternehmen so weit wie möglich über große eigene elektrische Erzeugungsanlagen verfügen, sodass sie im Energiesystem der Zukunft die Rolle von Prosumern einnehmen werden, anstatt der klassischen Verbraucherrolle heutzutage. Je mehr kumulierte Flexibilitätsoptionen sich innerhalb der Unternehmen aktivieren lassen, desto mehr Möglichkeiten haben Sie ihr Energiemanagement wirtschaftlich zu optimieren, indem sie Erzeugung und Verbrauch an die Marktsituation anpassen.

Ab einer gewissen Größe lohnt es sich für Unternehmen selbst an der Börse zu agieren ohne Anteile des Vermarktungserlöses an einen handelnden Dienstleister abzugeben. Somit werden Unternehmen und Konzerne auch aus bislang energiefernen Branchen an den Energiemärkten partizipieren [49]. Im Rahmen ihrer Optimierung werden diese Unternehmen auf alle in Abschnitt 2.2 vorgestellten Handelstypen zurückgreifen.

### 2.3.3 Kleine und mittlere Unternehmen (KMU) sowie Haushalte

Je kleiner Akteure sind, desto unwahrscheinlicher wird es sein, dass sie selbst an der Börse oder an regionalen Flexibilitätsmärkten handeln werden. Es lohnt sich für kleinere Prosumer wie KMUs oder einzelne Haushalte eher die eigenen Assets durch Dienstleister vermarkten zu lassen. Der zeitliche Aufwand der aktiven Vermarktung ist zu groß.

Jedoch ist es zu erwarten, dass es für kleine Prosumer normal sein wird sich Peer-2-Peer gegenseitig mit Strom zu beliefern. Der Strombezug via PPAs ist für kleinere Verbraucher ebenso interessant, wobei es jedoch eher im Interesse der Stromanbieter sein wird, Verträge mit größeren Abnehmern zu schließen.

### 2.3.4 Genossenschaften

Kleinere Erzeuger, Verbraucher und Prosumer wie Haushalte oder KMUs können sich zu Genossenschaften zusammenschließen. Energiegenossenschaften sind in der Lage die Assets ihrer Mitglieder kumuliert als Virtuelles Kraftwerk zu vermarkten, sodass kleine Akteure ihre Assets ohne Dienstleister an den Handelsplätzen anbieten können. Ebenso können genossenschaftlich besessene Anlagen, wie beispielsweise PV-Anlagen oder BHKWs von Wohnanlagen, durch die Genossenschaft selbst vermarktet werden.

Aus Sicht von Erzeugern sind Genossenschaften attraktive Vertragspartner im Rahmen von PPAs. Darüber hinaus können sich Genossenschaften intern optimieren, indem sie beispielhalber eine Plattform für Peer-2-Peer Handel der Mitglieder untereinander anbieten.

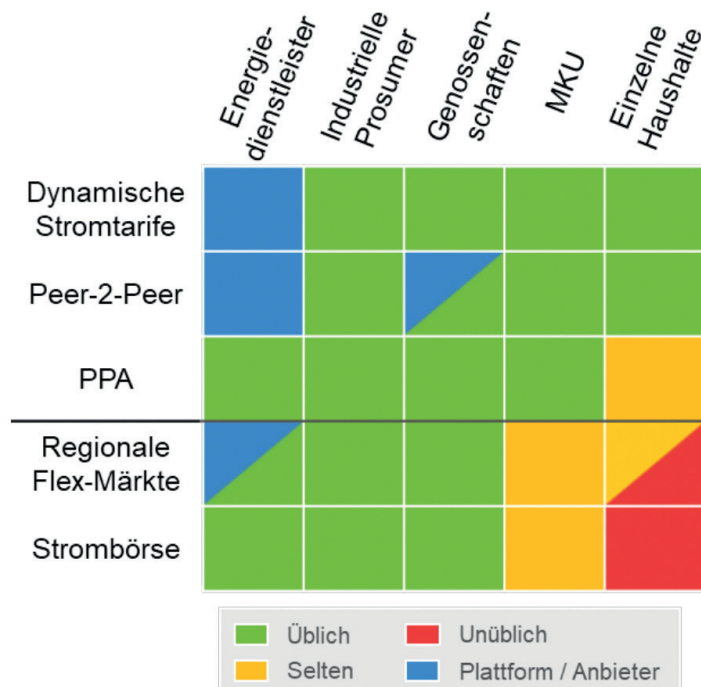


Abbildung 16: Qualitative Relevanz von Vertragsarten und Handelsplätzen für Akteure des elektrischen Energiehandels der Zukunft (eigene Darstellung)

### 3 Geschäftsmodelle in der Energiewirtschaft

Vereinfacht beschrieben, sind Geschäftsmodelle „Geschichten, die erklären, wie Unternehmen arbeiten (sollten). Dabei beantwortet ein gutes Geschäftsmodell die fundamentalen Fragen: Wer sind die Kunden (des Unternehmens), was wertschätzten diese und wie ist damit Geld zu verdienen?“ [50].

Entsprechend lassen sich entlang der „klassischen“ Wertschöpfungskette in der Energiewirtschaft eine ganze Reihe von verschiedenen Geschäftsmodellen identifizieren und beschreiben. Dies reicht von der Produktion von Energieerzeugungsanlagen oder notwendigen Dienstleistungen der Anlagensteuerung über den Energietransport bis hin zu unterstützenden (software-basierten) Prozessen zur Gewährleistung der Wertschöpfung [51]. Im Zuge der Liberalisierung wurde die vertikale Integration durch das sogenannte „Unbundling“, d. h. die Entflechtung der Bereiche Erzeugung, Netz, Vertrieb/Handel, aufgebrochen und der Markt wurde zunehmend wettbewerblich organisiert.

Beispielsweise bestehen bzw. bestanden die Einnahmequellen „klassischer“, integrierter Energieversorgungsunternehmen typischerweise aus den drei Bereichen Energie (inkl. Netzbetrieb), Energiedienstleistungen und Beratung [52]:

- Energie: Hausanschlusskostenbeitrag (Netz), Netznutzungsentgelte und Erlöse aus dem Energieverkauf.
- Energiedienstleistungen: In der Regel Arbeits- und Leistungs-, Grundpreisgefüge; im Bereich Contracting finden sich hier auch komplexe Einnahmestrukturen, wie Energieliefer- oder Einspar-Contracting.
- Beratung: Vergütet auf Basis von Festpreisen oder aufwandsabhängigen Preisen; kleinere Beratungsleistungen oder der Verleih von Energieanalyse-Geräten werden gelegentlich als Initialaufwand oder zur Nutzung von Cross-Selling-Potentialen unentgeltlich erbracht.

Darüber hinaus gibt es jedoch noch eine ganze Reihe weiterer Geschäftsmodelle in der Energiewirtschaft, von denen manche jedoch unter den bisherigen Rahmen- und Marktbedingungen nicht bzw. kaum erfolgreich anwendbar waren. Viele dieser „neueren“ Geschäftsmodelle zeichnen sich zudem dadurch aus, dass sie über das Kerngeschäft bzw. die Kernprozesse der Energiewirtschaft hinausgehen und damit auch neuen Stakeholdern den Kundenzugang im Energiesektor ermöglichen (siehe Abbildung 17).

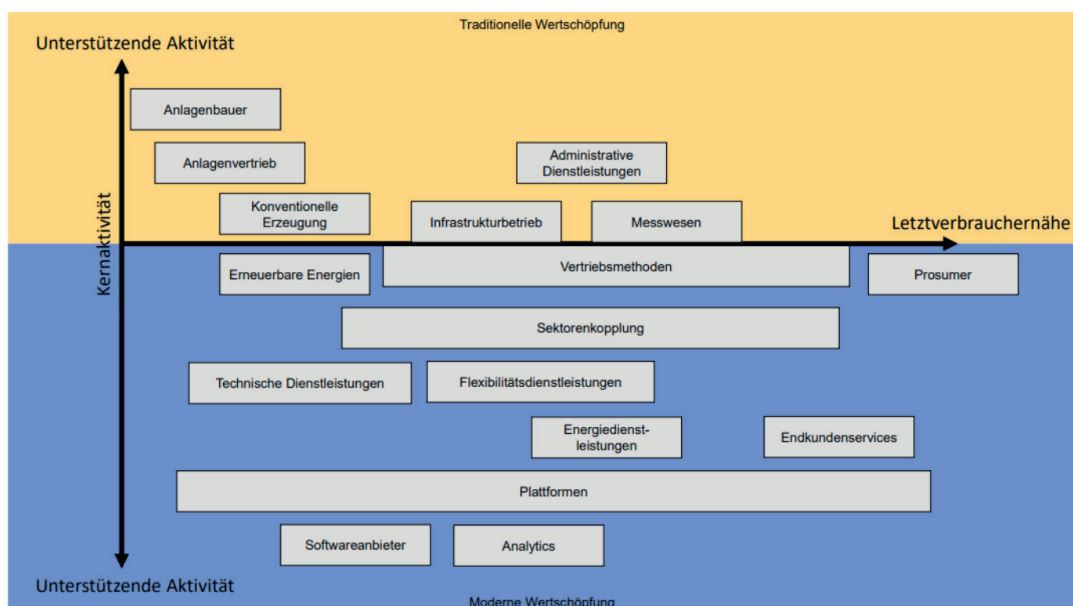


Abbildung 17: Übersicht zu den Geschäftsmodellklassen [51]

Im Bereich der traditionellen Geschäftsmodelle decken integrierte EVU und Stadtwerke viele Geschäftsmodelle ab. Deren Beitrag zu neueren Geschäftsmodellen fällt derzeit allerdings geringer aus [51]. Gerade Energiewende und Klimaschutz können allerdings Fortschrittsprojekte für den Industriestandort Deutschland und die Geschäftsmodelle in der Energiewirtschaft sein. Einerseits bieten sie



Chancen für Innovationen, neue Arbeitsplätze, Exportmöglichkeiten und Lebensqualität; andererseits bedeuten sie jedoch auch große Veränderungen und Herausforderungen für Unternehmen, Regionen und den Einzelnen [53].

Die auftretenden Wechselwirkungen und Beziehungen zwischen den Unternehmen und den Kunden oder anderen externen Beteiligten, sowie die Parallelexistenz und gegenseitige Beeinflussung von verschiedenen Geschäftsmodellen kann - angelehnt an die Biologie - auch als Ökosystem beschrieben werden. Ein wirtschaftliches Ökosystem, das entlang der „klassischen“ Wertschöpfungskette der Energiewirtschaft immer komplexere und dynamische Energie-, Informations- und Zahlungsflüsse aufweist und sich durch die Energiewende, aber auch die Liberalisierung und Digitalisierung im stetigen Wandel befindet (siehe auch Abbildung 18). Aus diesem Grund gilt es die Veränderungen der Geschäftsmodelle zu beschreiben und neue Wertschöpfungspotentiale aufzuzeigen.

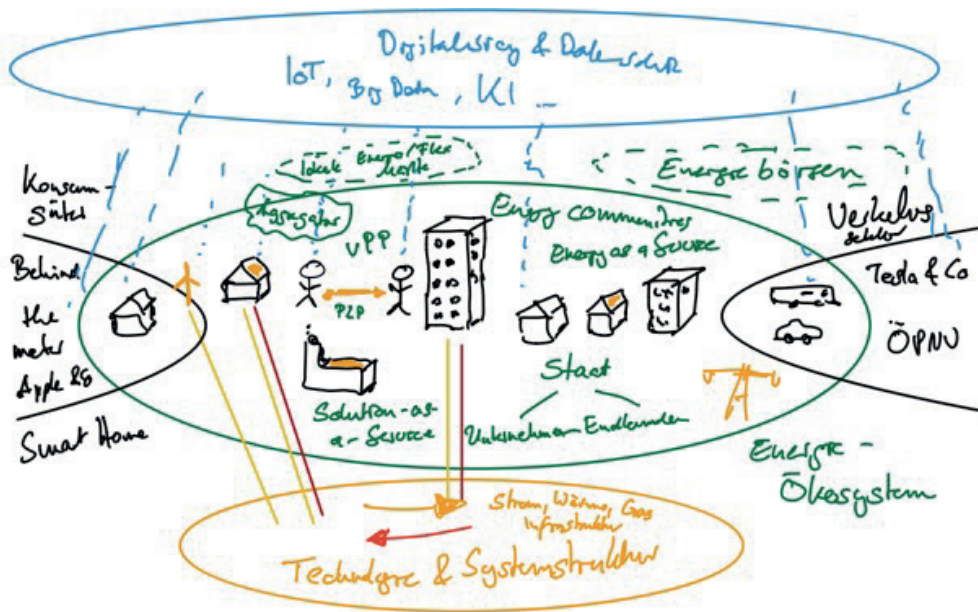


Abbildung 18: Skizze eines Energie-Ökosystems (eigene Darstellung)

### Infobox Geschäftsmodell

Der Begriff „Geschäftsmodell“ (engl. Business Model) wurde bereits mehrfach beschrieben, ist in der Literatur jedoch nicht einheitlich definiert. Mit dem Terminus „logic of business“ schuf Peter Drucker in den 1950er Jahren einen Vorläufer dessen, was heute unter dem Konzept Geschäftsmodell in der Managementlehre verstanden wird. Als ausformulierte Geschäftslogik, inklusive einer expliziten Spezifizierung der verschiedenen Elemente eines Geschäftsmodells (z. B. Nutzen- bzw. Wertversprechen-, Kunden- oder Ertragselement) und der Beziehungen zwischen den Elementen, dienen Geschäftsmodelle der Überführung der jeweiligen Unternehmensstrategie in Unternehmensprozesse (s. a. [54])

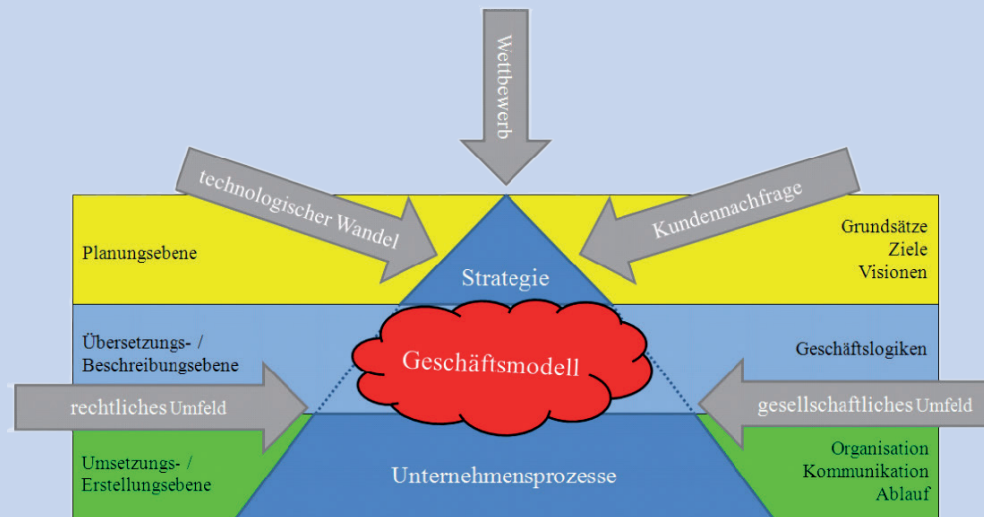


Abbildung 19: Geschäftsmodelle und Einflussfaktoren (nach [54])

Die große Stärke der Verwendung von ausformulierten Geschäftsmodellen ist, dass diese alle Elemente eines Systems zu einem großen Ganzen zusammenfügen. Sie können die Analyse und den Vergleich von Produkten, Services und Geschäftsprozessen verbessern und als Werkzeug genutzt werden, um die Geschäftslogiken einer Firmen besser zu erfassen, zu verstehen, zu kommunizieren, zu entwerfen, zu analysieren und zu verändern. In einem Geschäftsmodell wird nicht nur die (innovative) Technologie oder die Wertschöpfungskette betrachtet, sondern darüber hinaus auch die gesamte betriebswirtschaftliche Architektur eines Unternehmens, bis hin zum Nutzenversprechen an den Kunden, integriert.

Somit sind Geschäftsmodelle sowohl auf interne als auch externe Einflussfaktoren ausgelegt und sollten bei Veränderungen im Markt, des Kundenverhaltens oder der politischen Rahmenbedingungen entsprechend angepasst werden können. Technologische Innovationen, Markttransformationen und die frühe Antizipation möglicher Entwicklungen sind die Treiber dieser so genannten Geschäftsmodellinnovationen (engl. Business Model Innovation). Besonders wertvoll sind diese somit in Zeiten von Instabilität und Transformation. Modifikationen und Neugestaltungen bestehender Geschäftsmodelle sind dabei immer wieder notwendig, um in einem dynamischen Markt nachhaltig erfolgreich zu sein. Außerdem können sie dazu beitragen, sich mit Störungen, beispielsweise durch regulativen oder technischen Wandel, zu beschäftigen, die nach einem fundamental neuen Wettbewerbsverhalten verlangen.

### 3.1 Auswirkungen der Energiewende auf traditionelle Geschäftsmodelle

Die mit der Energiewende einhergehende Dekarbonisierung des Energiesystems hat - zusammen mit der Digitalisierung - einen immensen Einfluss auf die Ökosysteme der Energiewirtschaft. Die „klassische“ Wertschöpfungskette wird seit geraumer Zeit von einem zunehmenden Anteil zentraler erneuerbarer Energien (insbesondere Offshore Wind), vor allem aber dezentraler, teils vom Kunden selbst errichteter und betriebener Erzeugungs- und Speicheranlagen ergänzt [52].

Erneuerbare Energien decken, zum Teil gefördert durch gesetzliche Einspeisevergütungen, einen wachsenden Teil des Bedarfs und verdrängen Erzeugungseinheiten mit höheren Grenzkosten aus dem Markt. Infolgedessen sinken die Volllaststunden konventioneller (Groß-)Kraftwerke, was negative

Auswirkungen auf die Wirtschaftlichkeit des Betriebes dieser Anlagen hat. Großkraftwerke, die über Jahrzehnte z. T. auf über 7.000 Volllaststunden pro Jahr kamen, laufen bereits heute zur Deckung der sogenannten Residuallast teilweise weniger als 4.000 Volllaststunden jährlich – mit weiter stark abnehmender Tendenz. Die Betreiber dieser Anlagen suchen folglich nach weiteren Einnahmequellen neben dem reinen Energieverkauf, die sie in alternativen Märkten, wie z. B. dem Regelenergiemarkt, finden. Allerdings sind diese Märkte bzw. das Marktvolumen derzeit begrenzt, sodass sie nur einen Teil der Ausfälle kompensieren können.

Zudem hat auch die Liberalisierung des Strom- und Gassystems das Tempo der Veränderung immer weiter erhöht. Aus diesem Grund gilt es die Abgaben- und Umlagensystematik nezugestalten. Die regulativen Rahmenbedingungen, die einen signifikanten Teil der Geschäftsmodelle maßgeblich beeinflussen, sollten zeitnah im Sinne einer integrierten Energiewende umgestaltet werden. Ziel sollte dabei sein, ein diskriminierungsfreies System („Level Playing Field“) zu schaffen, das Verzerrungen zwischen Energieträgern und Sektoren beseitigt und Innovationen ermöglicht, damit sich z. B. auch mehr Effizienzmaßnahmen und THG-Einsparungen wirtschaftlich lohnen [55].

Darüber hinaus drängen im Zuge der Digitalisierung und auch der Elektrifizierung des Wärme- und Verkehrssektors immer mehr und neue Akteure in den Markt. Neben flexiblen Verbrauchern wie Elektrofahrzeugen und Wärmepumpen werden sich noch weitere Verbrauchertypen flexibel in das Stromsystem integrieren lassen (z. B. Kühlungen und Geräte). Die zunehmende Digitalisierung des Stromsystems wird diese Entwicklung unterstützen und – bei entsprechender regulatorischer Unterstützung – darüber hinaus neue Geschäftsmodelle zur Verbrauchsflexibilisierung entstehen lassen [8].

### 3.2 (Neue) Geschäftsmodelle 2050

Die voranschreitende Energiewende und der Ausbau erneuerbaren Energien, sowie die zunehmende Digitalisierung von Unternehmens-, Betriebs- und Kundenprozessen verändern die Struktur und die Wertschöpfung in der Energiewirtschaft nachhaltig. Die in Abbildung 20 dargestellten Geschäftsmodelle legen nahe, dass in allen Sektoren und Wirtschaftszweigen der Energiewirtschaft traditionelle Geschäftsmodelle durch die Dekarbonisierung, Dezentralisierung und Digitalisierung des Energiesystems betroffen sind [51].

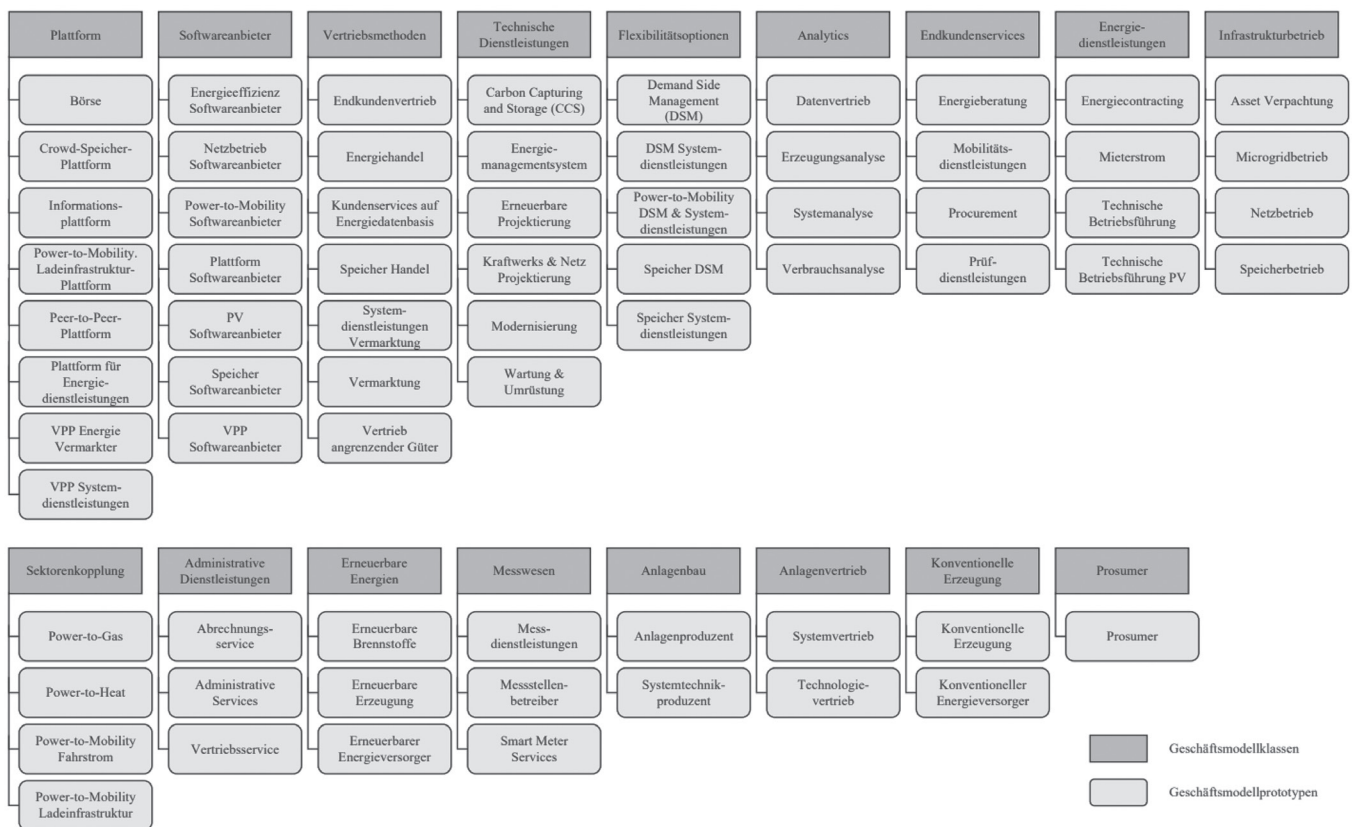


Abbildung 20: Die Geschäftsmodellklassen der Energiewirtschaft und darin enthaltene Geschäftsmodellprototypen (Quelle: [51])

Wie zuvor beschrieben werden dabei voraussichtlich auch neue Geschäftsmodelle bzw. Geschäftsmodellinnovationen im Bereich der „klassischen Kernaktivitäten“ wie dem Energiehandel entstehen. Noch höher ist die Wahrscheinlichkeit neuer Geschäftsmodelle allerdings in den „unterstützenden Aktivitäten“, in denen - bis hin zu integrierten Energie- bzw. Leistungslieferungen in nutzungsbasierten Service-Geschäftsmodellen - zukünftig über den Verkauf kundenspezifischer Anwendungen oder Lösungen - und eben nicht (nur) über den Handel eines Gutes - Erlöse generiert werden könnten.

Einerseits werden dabei mit dem steigenden Anteil fluktuierender Einspeisung im Handel mit (elektrischer) Energie zukünftig voraussichtlich zwei Einnahmemöglichkeiten entstehen [56]:

- Erlöse aus einem Markt für Strommengen (MWh), also dem bekannten, grenzkostenbasierten Energy-only-Markt
- Erlöse an einem neuen Markt für Investitionen in Kapazität (MW)

Andererseits gewinnt in einer zunehmend durch komplexe Wertschöpfungsnetzwerke strukturierten Energiewirtschaft (s. a. Energie-Ökosystem) die Kombination von Sach- und Dienstleistung an Relevanz [51]. Dies betrifft vor allem neuartige Dienstleistungen und digitale Lösungen neuer Unternehmen, die über das reine Angebot von Energie hinausgehen und in As-a-Service-Geschäftsmodellen kundenspezifische Lösungen transparent als kontinuierlichen Service anbieten. Dabei wird die Aufmerksamkeit der Kunden für die Lieferung von Strom stark abnehmen, da diese regelmäßig mit weiteren Dienstleistungen verknüpft sein wird. Die Versorgung mit Energie wird sich dann weniger auf Kilowattstunden beziehen, sondern aus Serviceangeboten bestehen, die sich nach den Bedürfnissen und der Lebenssituation der Kunden richten. Die Lieferung von Strom wird dementsprechend ein Teil eines Service- und Komfortangebotes sein, zu dem auch der Messstellenbetrieb gehören kann [49].

In Verbindung mit der voranschreitenden Digitalisierung könnten infolgedessen auch Automatisierung-, Software-, und Plattformlösungen an Bedeutung gewinnen. So wird beispielsweise einem direkten Stromhandel auf Basis von lokalen Märkten oftmals ein großes Potenzial zugesprochen. Dezentrale und digitale Peer-to-Peer Handelsplattformen ermöglichen, dass Verbraucher mit Stromerzeugern und Prosumers in einen unmittelbaren Handelskontakt treten und so neue, dezentrale Geschäftsmodelle entstehen könnten. Bisher haben Energieversorger eine Vermittlerrolle zwischen Erzeugern und Verbraucher angenommen, indem sie die Nachfrage vieler Verbraucher gebündelt und entsprechende großvolumige Strombezugsverträge zur Deckung der Nachfrage abgeschlossen haben. Ein direkter Handel zwischen Verbrauchern und Erzeugern könnte somit ermöglichen, dass Verbraucher nicht mehr auf Energieversorger als Intermediatoren angewiesen sind (siehe Abbildung 21) [57].

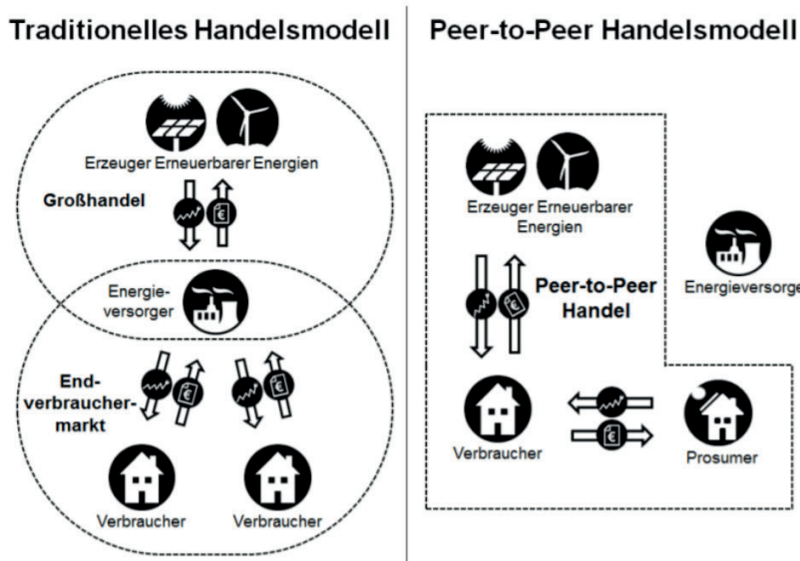


Abbildung 21: Geschäftsmodelle im heutigen Stromhandel und beim Peer-to-Peer Handel [57]

Auch Lösungen und neuen Geschäftsmodellen im Bereich der Kopplung mit dem Mobilitäts- und Wärmesektor kommt zukünftig, aller Voraussicht nach, eine größere Bedeutung zu. Insbesondere, da hier auch regulierte Bereiche der Energiewirtschaft (z. B. Netzbetrieb) und deregulierte Bereiche des Energie- und anderer Sektoren aufeinandertreffen. An diesen Stellen bringen Quereinsteiger aus

anderen Branchen durch den Einstieg in die Energiewirtschaft wichtige Kompetenzen zur Erbringung neuartiger Nutzen- und Wertversprechen ein. Aber auch traditionelle Unternehmen der Energiewirtschaft können ausgehend von ihrer Expertise innerhalb ihres Wertschöpfungsnetzwerks das Produktportfolio erweitern [51] oder könnten Energievertriebe beispielsweise die Rolle eines Elektromobilitätsanbieters einnehmen und so am Wachstum der „elektrischen Mobilität“ teilhaben. Über den Verkauf oder auch Contracting-, Leasing- und „Charging as a Service“-Angebote für private sowie öffentliche Ladesäulen, könnten EVUs, aber auch neue Akteure Ladeinfrastruktur an Haushalts- und Gewerbekunden sowie Kommunen und Städte verkaufen. Die Gebäude, insbesondere der Gewerbekunden, könnten zudem als Komplettsysteme betrachtet werden, in denen intelligente Messsysteme, Anlagen zur Eigenversorgung mit Strom und Wärme sowie die Einbindung der Ladeinfrastruktur intelligent gesteuert werden müssen, um Kosten zu senken und darüber hinaus sogar zusätzliche Einnahmen, beispielsweise mit der Bereitstellung von Systemdienstleistungen, generieren [49].

So betreffen Beispiele wie Energielieferung (ggf. über eine dezentrale Energieversorgung), Smart Metering, Energiedienstleistungen oder Elektromobilität die Energie- und Wohnungswirtschaft gleichermaßen, womit sich hier eine Kooperation zum beiderseitigen Nutzen anbietet [58]. Da, wo sich das intelligente Netz bzw. die intelligente Energieversorgung mit dem intelligenten Verbraucher bzw. Prosumer treffen (auch Grid Edge), werden zukünftig zahlreiche neue Geschäftsmodelle entstehen, die eine stärkere Kooperation der betroffenen Stakeholder erfordert, um den Herausforderungen gemeinsam zu begegnen. Denn im Fall von radikalen, disruptiven Änderungen, wenn der Zielmarkt beispielsweise noch gar nicht existiert, ist die Identifikation von (neuen) Marktmöglichkeiten gleichbedeutend mit der Bildung einer Vision von zukünftigen Märkten und so auch zukünftigen Geschäftsmodellen. Naturgemäß sind solche Visionen oder Kalkulationen immer nur so gut, wie die Güte der getroffenen Annahmen und Geschäftsmodelle können nicht vollständig im Voraus antizipiert werden. Dabei gilt es folglich, den Fehler zu vermeiden, Geschäftsmodelle zu erstellen, die „Lösungen auf der Suche nach Problemen“ sind.

### 3.3 Regulative Rahmenbedingungen

Wie zuvor mehrfach erwähnt, spielen die regulativen Rahmenbedingungen eine entscheidende Rolle bei der Entwicklung des Energiesystems, insbesondere da Teile des Systems wie die Strominfrastruktur als natürliches Monopol reguliert werden müssen, während andere Teile wie die Stromerzeugung dereguliert und somit marktwirtschaftlich organisiert sind. Dabei gilt das so genannte „Zieldreieck der Energieversorgung“ - bestehend aus Versorgungssicherheit, Wirtschaftlichkeit und Umweltverträglichkeit - als der politische Grundsatz der deutschen Energieversorgung. Die Energiepolitik versucht eine Balance der drei Ziele zu erreichen, indem die wechselseitigen Abhängigkeiten der drei Kategorien gleichberechtigt gegeneinander abgewogen werden. Gleichzeitig werden die Rahmenbedingungen der Energiepolitik Deutschlands als Mitgliedsstaat der Europäischen Union zunehmend durch europäische Vorgaben bestimmt. Allerdings beeinflussen auch lokale Gegebenheiten (z. B. Stadtentwicklungspläne, ausgewiesene EE-Flächen) die Entwicklung des Energiesystems, sodass regulative Rahmenbedingungen einerseits europäisch oder sogar sektorenübergreifend wirksam sein können, aber auch lokale Aspekte bzw. individuelle Sektoren stark betreffen.

Damit auch zukünftig eine sichere und unterbrechungsfreie Stromversorgung gewährleistet werden kann, ist es beispielsweise entscheidend, die Rahmenbedingungen für die Beschaffung von Systemdienstleistungen zu hinterfragen und bei Bedarf vorausschauend anzupassen. So könnten die Betreiber von Stromverteilnetzen dem Wachstum von EE in Verteilungsnetzen unter anderem dadurch begegnen, dass diese (lokalen) Vorgaben hinsichtlich des Netzanschlusses und der Bereitstellung von Systemdienstleistungen für Erzeugungsanlagen weiter verschärft und auch auf kleinere Anlagen angewendet werden [49]. Aber auch freiwillige Beschaffungsmodelle von Systemdienstleistungen wären möglich. Diese sind in der Regel allerdings marktbasierend und in vier unterschiedlichen Ausgestaltungen möglich [59]:

- Regulierte Vergütung
- Bilaterale Verhandlung
- Ausschreibung
- Auktion

Es gilt also einen regulatorischen Rahmen für Flexibilitätsmodelle schaffen, so dass es sich wirtschaftlich lohnt, Speicher, Erzeuger und Lasten **netzdienlich** zu betreiben, also die Ziele Versorgungssicherheit und Wirtschaftlichkeit in Einklang zu bringen, und dafür die Netzentgeltsystematik und die Anreizregulierung weiterzuentwickeln [60].

Beispiele hierfür wären [61]:

- Finanzierung der Netzkosten über Leistungspreise
- Lastflexibilisierung über zeitvariable Tarife
- Bundeseinheitliche Netzentgelte für die horizontale, gleichverteilte Kostenwälzung auf der Ebene der Übertragungsnetzbetreiber (ÜNB) zur besseren Verteilungsgerechtigkeit

Allerdings gilt es auch zu bedenken, dass regional unterschiedliche Netzentgelte die erzeugungsnahe Ansiedlung von Industrie begünstigen könnten.

Im Zuge der Corona-Krise gewinnt zudem der Vorschlag einer Energiepreisreform zusätzlich an Bedeutung. Der Wegfall der Abgaben und Umlagen beim Strompreis könnte die Haushalte und viele Unternehmen entlasten und dabei Chancen für neue Geschäftsmodelle schaffen. Außerdem würden so nachhaltige Produkte (wie beispielsweise batterieelektrische Fahrzeuge oder Wärmepumpen) attraktiver werden. Somit sind von der Reform unmittelbar konjunkturbelebende Effekte zu erwarten, auch (oder gerade) wenn der Wegfall der Abgaben und Umlagen nicht unmittelbar bzw. vollständig durch die Einnahmen aus einer CO<sub>2</sub>-Bepreisung gegenfinanziert wird [62].

Allerdings spielt die CO<sub>2</sub> Bepreisung eine wesentliche Rolle in Bezug auf den Einklang der Ziele Wirtschaftlichkeit und Umweltverträglichkeit. Dabei wäre ein **internationaler Ansatz** bei Klimaschutzinstrumenten, verlässliche Wettbewerbs- und Investitionsbedingungen sowie eine Ausrichtung der Klimaschutzpolitik auf Kosteneffizienz zielführend [8]. Allerdings ist hier zwingend notwendig, alle Kosten, insbesondere externe Kosten, zu betrachten (s.a. [63] oder [64]). Würde ein europäischer bzw. globaler Handel von CO<sub>2</sub>-Zertifikaten die ihm zugeordnete Rolle als Leitsystem zur Internalisierung externer Kosten wahrnehmen, lägen die CO<sub>2</sub>-Preise sicher deutlich höher als derzeit und auch höher als nach Prognosen bei 50 €/t CO<sub>2</sub> erwartet [65]. Der Emissionshandel ist in der umweltökonomischen Literatur aber das effizienteste Instrument, um ein vorgegebenes Umweltziel zu erreichen [66].

Von der möglichen Energiepreisreform gehen zudem im Mittel keine negativen, sondern im Gegenteil positive Verteilungswirkungen aus, insbesondere da der CO<sub>2</sub>-Fußabdruck positiv mit dem Einkommen korreliert ist. In Einzelfällen sind jedoch Maßnahmen zur Abfederung von sozialen Härten erforderlich [62]. Diese dürfen jedoch das THG-Einsparziel nicht konterkarieren.

Denn als finaler Punkt - der allerdings nicht explizit erwähnt ist - steht die gesellschaftliche Akzeptanz der Maßnahmen und Rahmenbedingungen im Zentrum des Zieldreiecks. Die Energiepolitik muss Akzeptanzpolitik in ihr Zentrum stellen, sonst scheitert die Energiewende [67].

Um die Akzeptanz zu maximieren, sollten nicht nur die drei erwähnten Ziele abgewogen werden, sondern Instrumente entwickelt werden, die die gesamte Handlungskette von der Erstinformation und Motivation über die Beratung und Maßnahmenentwicklung bis zur Finanzierung, Umsetzungsbegleitung und Evaluierung beziehungsweise Nachsteuerung umfassen. Die individuellen Entscheidungs- und Handlungsfreiheiten sollten mit einem ausgewogenen Mix zwischen Ordnungsrecht und Anreizpolitik bestehen bleiben. Beispielsweise sind Mindestanforderungen für Anbieter und die Stärkung von Transparenz und Anreizen gegenüber einer Umsetzungspflicht für alle Endverbraucher zu bevorzugen [55]. Dabei können mögliche Aktivitäten für eine wirkungsvolle Akzeptanzpolitik in vier Bereiche unterteilt werden, die alle gleichermaßen unverzichtbar sind, um das notwendige Maß an gesellschaftlicher Akzeptanz sicherzustellen (siehe Abbildung 22).

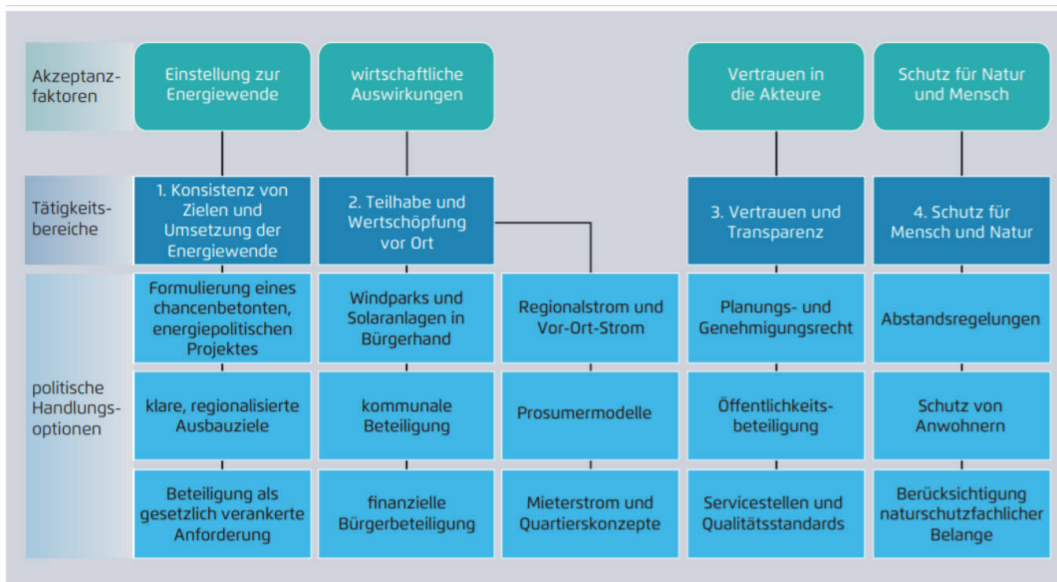


Abbildung 22: Politische Handlungsoptionen zur Stärkung der Akzeptanz (Quelle: [67])

Wie zuvor beschrieben wird sich mit der Transformation des Energiesystems nicht nur der Energiehandel und der Handelsgüter verändern, sondern auch neue Geschäftsfelder, -akteure und -modelle entstehen. Dazu zählen:

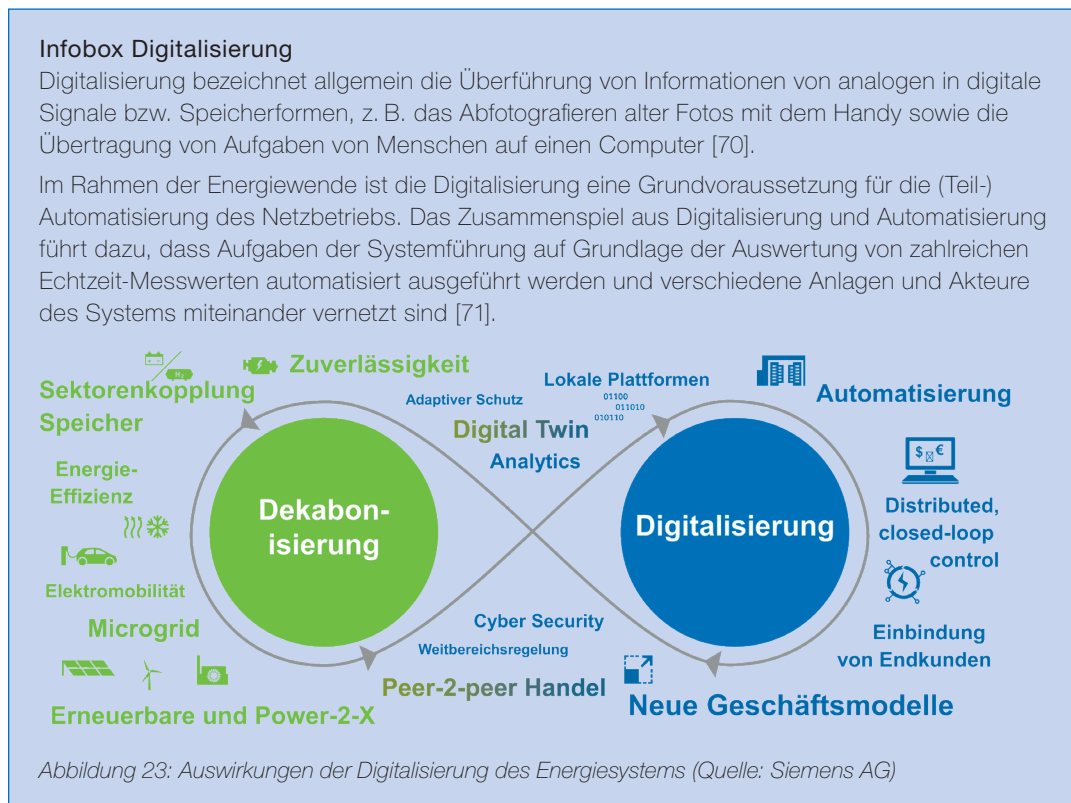
- Märkte für erneuerbare, physisch gebundene Energieformen. Dieses umfasst auch Märkte für Wasserstoff und synthetische Gase, sowie für synthetische Flüssigkraftstoffe oder auch biogene Energieträger
- eine Veränderung und Diversifizierung der Akteure im Energiehandel
- Einsatz von Flexibilitätsoptionen zur Wahrung auch der überregionalen Stabilität des transformierten elektrischen Systems, sowie Peer-2-Peer Handel zwischen mehreren gleichberechtigten Akteuren, bevorzugt Prosumer, die elektrische Energie beziehungsweise Leistung in einem regionalen Umfeld direkt untereinander handeln
- dynamische Stromtarife, Power Purchase Agreements und neue Geschäftsmodelle, die über das Kerngeschäft bzw. die Kernprozesse der Energiewirtschaft hinausgehen und damit auch neuen Stakeholdern den Kundenzugang im Energiesektor ermöglichen
- ein regulatorischer Rahmen für Flexibilitätsmodelle, so dass es sich wirtschaftlich lohnt, Speicher, Erzeuger und Lasten **netzdienlich** zu betreiben, also die Ziele Versorgungssicherheit und Wirtschaftlichkeit in Einklang zu bringen.

## 4 Digitalisierung und Datenschutz

Das elektrische Energieversorgungssystem wird sich zukünftig durch zahlreiche Energieanlagen auf Basis erneuerbarer Energien auszeichnen, die auf allen Netzebenen angeschlossen sind – vom Windpark am Höchstspannungsnetz bis zur PV-Dachanlage im Niederspannungsnetz. Dies bedingt den Einsatz von Flexibilitäten, u. a. Speichern, Power-to-X-Anlagen und flexiblen Verbrauchern, also einer immensen Vielzahl von neuen Anlagen, sowie neuen Marktmechanismen und Akteuren der Energiewirtschaft. Die Koordination des zukünftigen komplexen Energieversorgungssystems kann nur mithilfe von digitalen und automatisierten Lösungen gelingen [68]. Je mehr Anlagen und Akteure beteiligt sind, desto komplexer wird deren Koordination für einen sicheren und stabilen Netzbetrieb [45].

In allen Bereichen des Energieversorgungssystems kommt es somit zu einer steigenden Vernetzung durch Informations- und Kommunikationstechnologien (IKT), d. h. Sensorik und Messtechnik. Dazu zählt auch ein breiter Rollout von intelligenten Messsystemen (engl. Smart Meter) und zugehörigen Smart Meter Gateways für dezentrale Anlagen [68], um die notwendige Beobachtbarkeit und Steuerbarkeit von Anlagen auch in der Mittel- und Niederspannung zu erreichen [69]. Daneben ist zudem eine aktive Systemführung mit entsprechenden Eingriffsmöglichkeiten auf den Netzbetrieb in kritischen Netzzuständen relevant, wie sie aktuell vor allem im Übertragungsnetz besteht.

Die Digitalisierung bietet aber auch Risiken, da mit steigender Anzahl vernetzter Anlagen die potenzielle Angriffsfläche für Cyberkriminelle steigt. Zudem müssen Grundfunktionalitäten der Anlagen auch bei Ausfall der Kommunikation gewährleistet sein. Aus diesem Grund ist die Resilienz des Systems ein wichtiges Kriterium für die Umsetzung der Digitalisierung. Die Verfügbarkeit und Qualität von Daten sowie das Verarbeiten von großen Datensätzen und die Gewährleistung des Datenschutzes sind Grundvoraussetzung für ein vernetztes, digitalisiertes Energiesystem [45].



### 4.1 Technologien

Mit der steigenden Anzahl zu integrierender Anlagen und Akteure, steigt auch der Bedarf an Flexibilitäten, um einen stabilen Ausgleich zwischen Stromerzeugung und -bedarf zu erreichen. Flexible Erzeugungsanlagen (Kraftwerke, die ihre Produktion schnell anpassen können), Speicher, Sektorkopplungstechnologien, leistungsfähige Netze, die Strom großflächig transportieren und Lastmanagement (engl. Demand Side Management) können Einfluss auf das Gleichgewicht aus Stromerzeugung und Stromverbrauch nehmen. Während im Zuge des Lastmanagements bisher hauptsächlich indus-



trielle Lasten gezielt aus- oder eingeschaltet wurden, bietet auch die Summe an privaten Haushalten großes Potenzial, das durch den Einsatz von entsprechender IKT genutzt werden kann. So können beispielsweise private Haushalte durch ein Strompreissignal über niedrige Strompreise informiert werden und über intelligente Steuerungen flexible Lasten kostengünstig und netzdienlich versorgen, z. B. Elektrofahrzeuge, Anlagen zur Erzeugung von Wärme/Kälte oder auch das Laden/Entladen von Speichern.

Mit der steigenden Komplexität des Energiesystems wird ein hochaufgelöster Überblick (u. a. viele Messpunkte, Datenaustausch, Datenverarbeitung) zur Energiebereitstellung und -nutzung mit Hilfe von modernen Messsystemen immer wichtiger [72]. Die erfassten Daten müssen über geeignete und sichere Schnittstellen übertragen werden und anschließend über geeignete Infrastruktur den Netz- und Marktakteuren verschlüsselt bereitgestellt werden.

Für den Datenaustausch sind verschiedene Technologien denkbar, darunter sowohl leitungsgebundene als auch funkbasierte Lösungen. Eine Einteilung erfolgt in [69] anhand der Gesamtübertragungsdauer (engl. Round Trip Time, RTT), d. h. der Zeit zwischen Absenden eines Datenpakets und Empfang einer Bestätigung. Eine mögliche funkbasierte Lösung kann in Zukunft das 5G-Netz (5. Generation des Mobilfunks) darstellen [73].

Die Infrastruktur basiert auf Rechenzentren für große Akteure, z. B. Übertragungsnetzbetreiber, Plattformen mit Laufzeitumgebungen für Verteilnetzbetreiber, große Kraftwerke oder Energiezellen sowie Software-Anwendungen für skalierbare Lasten, kleinere Energiezellen oder virtuelle Kraftwerke. Die zur Verfügung stehenden Daten müssen ggf. an verschiedenen Stellen verarbeitet und genutzt werden können, beispielsweise zur Steuerung der Ladung von Elektrofahrzeugen. In Abhängigkeit der Anwendungen und Akteure sind verschiedene IT-Dienstleistungen denkbar. Wichtig sind zukünftig herstellerunabhängige Kommunikationsstandards sowie Cloud-Dienste zum Teilen der Daten.

## 4.2 Messtechnik und Schnittstellen

Intelligente Messsysteme, sogenannte Smart Meter, werden zunehmend die alten analogen Stromzähler (Ferraris-Zähler) ersetzen. Smart Meter bestehen aus einem digitalen Stromzähler, der den Stromverbrauch ermittelt und speichert und aus einem Kommunikationsmodul (Smart Meter Gateway), das die Datenübertragung ermöglicht. Erst durch dieses Modul wird das Messsystem intelligent, d. h. es kann Signale senden und empfangen [9].

Mit dem Gesetz zur Digitalisierung der Energiewende werden Smart Meter verpflichtend eingeführt für Verbraucher mit einem Jahresstromverbrauch von 6.000 Kilowattstunden oder mehr und bei Anlagenbetreibern ab einer installierten Leistung von 7 Kilowatt. Auch bei regelbaren Lasten, beispielsweise Wärmepumpen, sollen Smart Meter eingesetzt werden. Bis 2032 muss jeder Zähler modern, d. h. digital oder intelligent sein [74]. Der Smart-Meter-Rollout wird jedoch kontrovers diskutiert. Im März 2021 wurde die Einbauverpflichtung gestoppt, da die Systeme nicht die gesetzlichen Anforderungen erfüllten [75, 76].

Die Messdatenerhebung durch intelligente Messsysteme stellt eine Grundvoraussetzung für eine digitale und automatisierte Energieversorgung dar. Im Energiewirtschaftsgesetz (EnWG) § 12 Abs. 4 wird die Verpflichtung aller Akteure im elektrischen Energieversorgungssystem zur Bereitstellung betriebsnotwendiger Informationen festgelegt. Netzbetreiber müssen alle Daten und Informationen bereitgestellt bekommen, die zur Aufrechterhaltung des Netzbetriebes notwendig sind. In der Novelle von 2011 wird das Errichten eines Energieinformationsnetzes für den Austausch relevanter Daten beschrieben. Die Art der Umsetzung des Informationsnetzes wird seitdem von Stakeholdern kontrovers diskutiert [77].

Nicht nur die Messsysteme von Kundenanlagen müssen intelligent werden. Auch Messsysteme mit Strom- und Spannungswandlern z. B. in Schaltanlagen, müssen in der Lage sein, sowohl untereinander als auch mit der übergeordneten Leitstelle Daten auszutauschen. Dadurch können beispielsweise neue Anforderungen an die Erkennungen von Netzfehlern mit Zwischeneinspeisung oder bei geringem Unterschied zwischen Last- und Fehlerstrom erfüllt werden [69]. Auch intelligente Messwandler benötigen eine Kommunikationsschnittstelle, welche die gemessenen Daten überträgt. Mithilfe der Informationen durch intelligente Messsysteme können auch Aussagen zur Lebenszeit von Komponenten getroffen werden. Die Studie [69] kommt zu dem Schluss, dass die relevanten Funktionen bereits von heute verfügbaren Komponenten abgedeckt werden. Dazu gehört auch Aktorik, die über Signale

aus Leitstellen oder dem Markt aktiv Einfluss auf den Netzbetrieb nehmen kann, indem beispielsweise die Wirk- und Blindleistungseinspeisung von Erzeugungsanlagen geregelt wird.

### 4.3 Systemebene

Durch Veränderungen im Energiesystem, darunter Dezentralisierung, Digitalisierung, neue Marktstrukturen und ein Betrieb an den Kapazitätsgrenzen, steigen die Anforderungen an die Systemführung. Bereits heute sind Netzleitwarten digitalisiert und überwachen große Regionen und große Mengen an Daten aus den entsprechenden Netzregionen. Während die digitalisierte und teilautomatisierte Systemführung bisher hauptsächlich im Höchst- und Hochspannungsnetz umgesetzt ist, wird auch im Nieder- und Mittelspannungsnetz verstärkt eine aktive Netzführung angestrebt [78]. Die Koordination der Anlagen und Akteure des Systems soll zukünftig hochautomatisiert erfolgen, d. h. unter Berücksichtigung von Marktprozessen und Sekundärdaten, beispielsweise Wetterprognosen. Nur bei seltenen Störereignissen wird ein Systemführer für den Betrieb hinzugezogen [69]. Trotz einer großflächigen Automatisierung des Systems, müssen Schalthandlungen und die entsprechenden Algorithmen nachvollziehbar bleiben.

Um die Komplexität des Systems zu beherrschen sind digitale und (teil-)automatisierte Lösungen notwendig, die große Datenmengen bewältigen und einen sicheren Betrieb sowohl im Normalbetrieb als auch während Netzfehlern oder beim Netzwiederaufbau gewährleisten. Dazu muss auch die Kommunikation sowohl hierarchisch z. B. zwischen Übertragungs- und Verteilnetzbetreibern als auch horizontal, d. h. zwischen den verschiedenen Akteuren, intensiviert werden.

Um der steigenden Komplexität des Energiesystems und dessen Steuerung zu begegnen, werden in [78] zellulare Umsetzungen beschrieben. Dabei soll auch die kommunikationstechnische Vernetzung dezentral erfolgen, indem das bisher zentral geführte Gesamtsystem in kleinere Systeme mit eigenständiger Regelung eingeteilt wird. Diese eigenständigen, aber gleichzeitig verbundenen Regelkreise minimieren den Kommunikationsbedarf mit benachbarten oder übergeordneten Netzregionen und führen dadurch zu einer geringeren Verletzbarkeit des Gesamtsystems.

Künstliche Intelligenz (KI) kommt auch in der Energiewirtschaft immer stärker zum Einsatz – beispielsweise bei der Steuerung von Stromnetzen und dem Zusammenwachsen der Energiesektoren Strom, Wärme und Verkehr. KI hat großes Potenzial, die großen Datenströme (Big Data) der Digitalisierung effektiv zu nutzen und so der zunehmenden Komplexität des Energiesystems zu begegnen. Gleichzeitig ist KI eine Schlüsseltechnologie, um die Energieeffizienz in der Industrie zu erhöhen [79]. Verschiedene Autonomiestufen von einem System, das rein manuell geführt wird (Stufe 0) bis hin zur Vollautomatisierung des Gesamtsystems werden in [69] beschrieben.

### 4.4 Schutz, Sicherheit und Resilienz

Aufgrund der steigenden Anzahl von Anlagen und Akteuren und deren digitaler Vernetzung, steigen die Herausforderungen, um weiterhin die Stabilität, Zuverlässigkeit und Sicherheit des Systems zu gewährleisten. Für verschiedene Player können die Sicherheits- und Schutzanforderungen nach Abbildung 24 definiert werden [78].

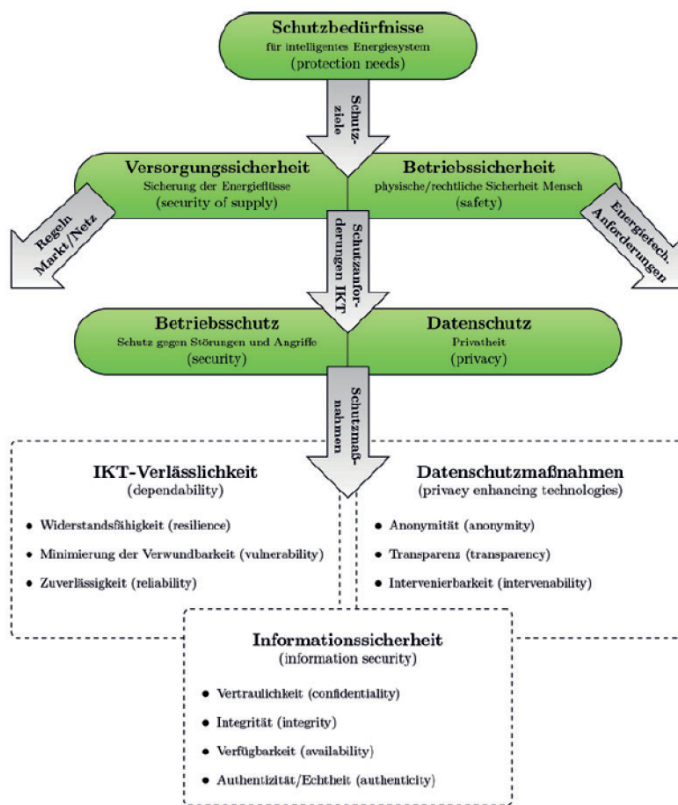


Abbildung 24: Schutzbedürfnisse nach [78]

Um ein hohes Maß an Versorgungssicherheit zu gewährleisten, muss das Energiesystem resilient sein. Ein resilientes System ist in der Lage, seine Funktionsfähigkeit auch unter hoher Belastung aufrechtzuerhalten oder nach Versagen schnell wieder ein akzeptables Maß an Funktionsfähigkeit zu erlangen und aus solchen Vorgängen zu lernen. Es kann u. a. Komponentenausfälle, Einwirkungen von außen wie Erdbeben oder Extremwetterereignisse, Netzüberlastungen oder Cyber-Attacken sowie „schleichende Prozesse“ wie Materialermüdung verkraften, ohne zu kollabieren [45].

Eine Resilienz-Strategie erfordert ein Portfolio an Maßnahmen von der möglichst weitgehenden Identifikation von Schwachstellen und Risiken, über Maßnahmen zur Unterstützung der Robustheit und Widerstands- und Anpassungsfähigkeit, bis hin zu lernenden und das System verbessernden Maßnahmen einschließlich einer kosteneffizienten Notfallplanung. Zudem muss eine nicht- bzw. schwach-digitale Rückfalllösung konzipiert werden, falls das Kommunikationssystem ausfällt [45].

## 4.5 Cyber Security

Im Zuge der fortschreitenden Digitalisierung des Energiesystems und der zunehmenden Automatisierung von Betriebsprozessen gewinnt die Sicherheit vor Cyber-Attacken weiter an Bedeutung. Der steigende Schutzbedarf gegen Cyber-Angriffe resultiert dabei vor allem aus einer zunehmenden Vernetzung der Sekundärtechnik bzw. Operating Technology (OT) sowie erhöhten Anforderungen an die Datenverarbeitung und eine immer stärkere Integration der Informations- und Kommunikationstechnologie in die Sekundärtechnik („IT/OT Integration“).

Beim Schutz eines Energieversorgungssystems liegen die Prioritäten dabei anders als bei herkömmlichen IT-Systemen. In der IT steht die Vertraulichkeit der Daten stets an oberster Stelle. In der OT hingegen ist die Verfügbarkeit wichtiger. Ein System muss verfügbar sein, um andere Systeme und Personen um jeden Preis vor Schaden zu schützen. Durch das Zusammenwachsen von Betriebstechnologie und Informationstechnologie sind Energieversorgungsnetze heute bekannten, aber auch bisher unbekanntem Bedrohungen ausgesetzt.

In Deutschland müssen Betreiber von kritischen Infrastrukturen deshalb zahlreiche gesetzliche Anforderungen erfüllen. Der IT Sicherheitskatalog der BNetzA beispielsweise fordert die Implementierung

eines Informationssicherheits- Managementsystems (ISMS) sowie effektive Maßnahmen zum Schutz der Infrastruktur [80]. Zudem gewährleisten Standards und Normen wie die IEC 62351 und das BDEW White Paper 2.0 [81] eine sichere Kommunikation und beschreiben die Anforderungen an Informationssicherheit, z. B. Vertraulichkeit, Datenintegrität, Authentifizierung, Unleugbarkeit. [78, S. 81] [81]

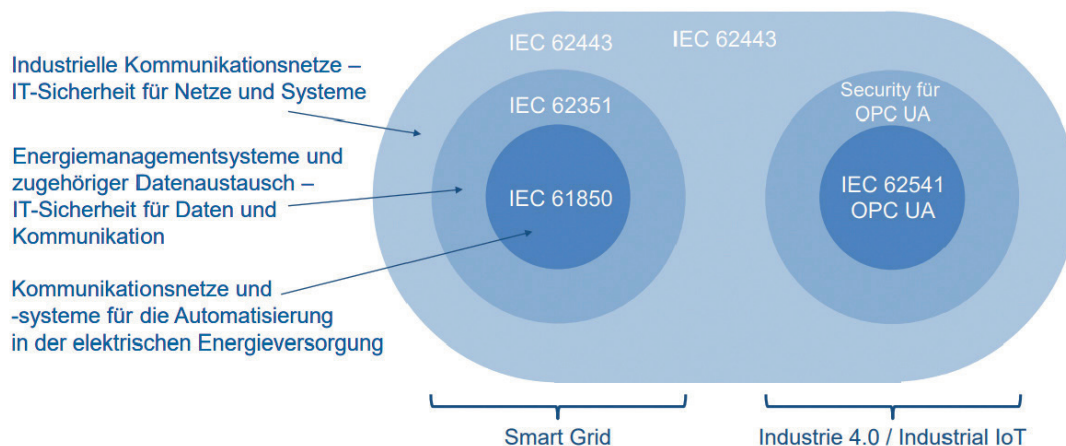


Abbildung 25: Normen und Standards für sichere Kommunikation (Quelle: [82])

Zudem schafft der Trend zu Monopolen in der IKT ein zunehmendes Risiko. Ein homogen aufgebautes System erhöht das Risiko bei Cyberangriffen und deren Auswirkungen, da das Auftreten sogenannter „Common Cause Failures“, also Ausfälle mehrerer Komponenten oder Systeme, die als Folge einer einzelnen Fehlerursache oder eines einzelnen Ereignisses auftreten, begünstigt wird. Verwendet beispielsweise ein Großteil der Prosumer eine baugleiche Regelungseinheit für ihre Anlagen, erleichtert dies potenziellen Cyberkriminellen, sich Informationen und letztlich die Kontrolle über einen Großteil des Systems zu verschaffen. Besonders problematisch sind in dieser Hinsicht grundlegende Komponenten mit Schnittstelle zum Internet, für die es keine Sicherheitsstandards gibt [45].

## Datenschutz

Im Zuge der Digitalisierung des Energiesystems und dem damit verbundenen Datenaustausch, muss der Schutz von personenbezogenen Daten zunehmend berücksichtigt und durch geeignete Maßnahmen gewahrt werden. Dazu müssen die zu übertragenden Daten angemessen verschlüsselt werden, sodass nur Berechtigten diese Daten zur Verfügung stehen. Zudem dürfen über den Stromverbrauch von aktiven Geräten keine Rückschlüsse auf Aktivitäten in Haushalten, beispielsweise den Schlafrythmus oder die Anwesenheit bzw. Abwesenheit von Personen möglich sein. Um die Anonymität und Unbeobachtbarkeit von Haushalten zu gewährleisten, können diese Lasten aggregiert, also zusammengefasst werden, sodass Rückschlüsse auf den einzelnen Haushalt erschwert werden. Außerdem müssen die ausgetauschten Daten und deren Verarbeitung mit vertretbarem Aufwand nachvollzogen und überprüft werden können. Der Kunde muss also einsehen können, wer wann welchen Messwert von ihm erhalten hat (Transparenz) [78].

Das vom Bundesamt für Sicherheit in der Informationstechnik (BSI) erarbeitete Schutzprofil für Smart Meter Gateways sieht nach [78] zwar die vertrauliche Übermittlung und Speicherung von Daten vor, Maßnahmen zur Gewährleistung der Anonymität von Kunden oder zum Verhindern einer Profilbildung bezüglich des Verbraucherverhaltens sind jedoch nicht hinreichend definiert.

### Infobox Datenschutz

Der Datenschutz soll den Einzelnen davor schützen, dass er durch den Umgang mit seinen personenbezogenen Daten in seinem Persönlichkeitsrecht beeinträchtigt wird. Mit Datenschutz wird daher der Schutz personenbezogener Daten vor etwaigem Missbrauch durch Dritte bezeichnet [83].

Datenschutzmaßnahmen sind technische oder organisatorische Schutzmaßnahmen zur Umsetzung der sich aus Belangen des Datenschutzes ergebenden Schutzanforderungen [78].

# C Vision Energiesystem 2050

## 1 Einführung

In Ergänzung zur erstellten und ihm ersten Teil dieses Dokuments dargestellten Metastudie zum Energiesystem 2030/2050 wird hier die „Vision Energiesystem 2050“ beschrieben.

Nach Verabschiedung des überarbeiteten Klimaschutzgesetzes im Juni 2021 wurde der Termin für Klimaneutralität der Bundesrepublik Deutschland von 2050 auf 2045 vorgezogen. Da dies aber wenig bis keinen Einfluss auf Grundsatzüberlegungen und Lösungen hat, wurde im Rahmen dieses Dokuments an dem Namen „Vision Energiesystem 2050“ festgehalten. Die aufgezeigten Möglichkeiten und notwendige Maßnahmen sind aber prinzipiell auch für 2045 sowie die aktuell anvisierten Zwischenziele gültig und anwendbar.

Die Vision Energiesystem 2050 ist das Ergebnis von weitergehenden Überlegungen innerhalb der Task Force. Dabei erheben die gemachten Aussagen keinen Anspruch auf Vollständigkeit und basieren nur teilweise auf bereits vorhandenen Technologien oder Prozessen. Sie sollen lediglich zu weiteren Diskussionen und neuen Entwicklungen anregen. Diese Überlegungen sind geprägt von dem Gedanken, dass sich Deutschland zu 100 % mit erneuerbarer Energie mit einem strom- und gasbasierten Verbundsystem versorgen kann. Hierzu gibt es zahlreiche Referenzen, von denen drei [84–86] hier beispielhaft genannt werden. Sie wurden aber nur bedingt berücksichtigt.

Zusätzlich wurde bei Beginn der Arbeiten der Task Force der Gedanke geboren, die Energiewende auch für technische Laien und damit einer breiten Schicht der Bevölkerung verständlich zu machen. Dieser Zielsetzung wird in diesem Kapitel versucht Rechnung zu tragen, in dem bewusst auf technische Details und Tiefgang verzichtet wird.

Für alle Adressaten dieses Dokuments mit nicht vollständigem Fachwissen ist ein Glossar beigefügt, in dem alle in diesem Teil fett gedruckten Begriffe kurz erläutert werden.

## 2 Systemübersicht

Die im September 2010 von der Bundesregierung verkündete Zielsetzung für die Energiewende sah für das Jahr 2050 vor, dass mindestens 60 % des Energieverbrauchs bzw. 80 % der elektrischen Energie von erneuerbaren Energiequellen bereitgestellt werden sollen. Ein weiteres Ziel war 50 % Reduktion des gesamten Energieverbrauchs gegenüber dem Jahr 2008. Diese Ziele wurden durch die Beschlüsse zur Klimaneutralität entscheidend überarbeitet und verbindlich festgeschrieben.

Die Vision Energiesystem 2050 setzt sich als Ziel eine 100%-ige Versorgung mit erneuerbarer Energie in einem strom- und gasbasierten Verbundsystem zu realisieren.

### **Vision Energiesystem 2050**

Deutschland versorgt sich zu 100 % mit erneuerbarer Energie in einem strom- und gasbasierten Verbundsystem

Es ist wichtig darauf hinzuweisen, dass dieser Ansatz keinesfalls als nationaler Alleingang anzusehen ist. Vielmehr wird im großen Maßstab auch der internationale Austausch erneuerbarer Energie notwendig. Hierzu ist auch der einfache Marktzugang unter Berücksichtigung sich ändernden Systemstrukturen sowie eine weitestgehend angeglichenere europäische Regulierung sicherzustellen.

Für Deutschland als exportorientierte Nation bedeutet die Umsetzung einer 100%-Versorgung mit erneuerbarer Energie einen wichtigen Beitrag für die zukünftige wirtschaftliche Entwicklung. Wenn ein führendes Industrieland zwischen dem 47. und 55. nördlichen Breitengrad dies erreichen kann, ist das mehr als nur ein weiteres Reallabor. Die Lösung und der Weg dorthin werden zu einem wichtigen Treiber für Wirtschaftswachstum und Wohlstand für ein an natürlichen Ressourcen armes Land.

## 2.1 Systemstruktur und Systemgrenzen

Die heutigen Energiesysteme wie Elektrizität, Gas und Wärme weisen überwiegend zentrale, hierarchische Strukturen auf, die sich über mehr als 100 Jahre getrennt voneinander entwickelt haben, mit separater Planung, Betrieb und Optimierung. Wirtschaftliche Gründe haben dazu maßgeblich beigetragen. Umweltaspekte wie CO<sub>2</sub>-Belastung, Feinstaub etc. sowie die Verfügbarkeit von Ressourcen wie Kohle und Gas waren zu Beginn zweitrangig, haben aber mit der Zeit die führende Rolle übernommen. Dies führte schließlich zur Energiewende.

Das zukünftige Energiesystem wird eine mehr dezentrale Struktur aufweisen mit kleineren Erzeugungseinheiten, basierend auf Photovoltaik, Wind on-shore und off-shore, wo möglich Geothermie, biogenen nachwachsenden Brennstoffen sowie der Wasserkraft. Die Anzahl der Erzeugungseinrichtungen wird sich von heute etwa zwei Millionen auf etwa sechs Millionen erhöhen. Dabei wird z. B. eine Photovoltaikanlage auf einem Einfamilienhaus oder eine einzelstehende Windturbine als eine Erzeugungseinheit gezählt.

Aber nicht nur die Anzahl der Erzeugungseinrichtungen wird sich erhöhen. Auch die Struktur des Energiesystems wird sich massiv verändern, hin zu mehr und mehr dezentralen Einheiten mit eigenständiger Planung und Betrieb sowie Optimierung. Wichtig wird dabei sein, das gesamte Energiesystem zu betrachten, also Elektrizität, Gas und Wärme, unter Einschluss von privaten, kommerziellen und industriellen Verbrauchern einschließlich der benötigten Energie für den Bereich Mobilität. Die Verkehrswende wird damit vitaler Bestandteil der Energiewende u. a. durch die stärkere Elektrifizierung. Zudem unterstützt ein verändertes Mobilitätsverhalten zusätzlich die Verkehrswendebestrebungen für eine nachhaltigere Verkehrsentwicklung.

### Infobox Zellularer Ansatz

Der zelluläre Ansatz basiert auf der Bildung von Energiezellen in einem räumlich abgegrenzten Gebiet unter Einbeziehung aller Arten von Energie. Ziel ist es, die Erzeugung und den Verbrauch von Energie innerhalb der Zelle möglichst zu jeder Zeit auszubalancieren, sofern dies technisch und wirtschaftlich sinnvoll ist.

Dezentrale oder zelluläre Strukturen wie sie heute bereits diskutiert und teilweise umgesetzt werden, sind nur der Anfang. Die grundsätzliche Überlegung, Erzeugung und Verbrauch von Energie auf der niedrigsten möglichen Ebene auszugleichen, wird prinzipiell erhalten bzw. sich weiterentwickelt haben. Allerdings müssen alle Arten von Energie einschließlich der Mobilität berücksichtigt werden. Darüber hinaus werden Konzepte benötigt für Versorgungsgebiete, wo das Grundprinzip des Ausgleichs zwischen Erzeugung und Verbrauch nicht oder nur bedingt zum Einsatz kommen kann. Dies trifft u. a. für städtische Strukturen und Industriegebiete mit energieintensiven Betrieben zu.

Es wird aber auch weiterhin zentrale Strukturen geben, die dem Energietransport, aber noch wichtiger der Speicherung von Energie, dienen. Aus heutiger Sicht werden Wasserstoff bzw. daraus hergestellte synthetische Gase eine wichtige Rolle spielen. Sicher ist, dass für diese zukünftige Energiewelt sowohl die Transport- als auch die Verteilungsinfrastruktur beider Energieträger essenziell eng miteinander gekoppelt sein werden.

Entsprechend dem im ersten Teil gemachten Ansatz, zunächst den Fokus der Untersuchungen auf Deutschland zu begrenzen, wird auch in diesem Abschnitt verfahren. Bedingt durch das mehr dezentrale, zelluläre Grundprinzip spielt eine staatenübergreifende, EU-weite Infrastruktur eine wichtige aber nicht die dominierende Rolle. Trotzdem kann der zelluläre Ansatz prinzipiell auch für die Nationalstaaten der Europäischen Union zum Einsatz kommen. Hier gilt es dann, den dezentralen Gedanken groß zu denken.

Wie das im Einzelnen aussehen könnte, erfordert weitere Untersuchungen aber noch wichtiger ein radikales Umdenken der europäischen Politik. Sehr wohl sollten zur Schaffung eines großen Binnenmarktes in Zukunft rechtliche und regulatorische Regelungen harmonisiert und u. a. technische Normen festgelegt werden. Inwieweit die freie Wahl des Versorgers bei Umsetzung des zellulären und überwiegend dezentralen Ansatzes sinnvoll ist, muss technisch-fundiert und seriös diskutiert werden.

## Systemstruktur und Systemgrenzen

Das Energiesystem im Jahr 2050, basierend auf dezentralen erneuerbaren Energieressourcen, wird anders aufgebaut sein als das heute existierende. Zellulare Netze werden wesentlicher Bestandteil sein und dem Gebot folgen, dass Erzeugung und Verbrauch möglichst innerhalb der Zelle auszubalancieren sind.

Für diese zukünftige Energiewelt sind sowohl die Transport- als auch die Verteilungsinfrastruktur aller Energiemedien essentiell und werden eng miteinander gekoppelt sein. Bei zeitlich in etwa ausgeglichener Erzeugung und Verbrauch werden überwiegend das Stromnetz und Batterien als Kurzzeitspeicher genutzt. Das Gasnetz dient vorrangig der längerfristigen Speicherung von Energie für die erzeugungsferne Versorgung.

Durch Nutzung verfügbarer erneuerbarer Energieressourcen in den Regionen kann der resultierende Energiefluss in Deutschland von Nord nach Süd, also von Erzeugung überwiegend durch Windenergie, zum Verbrauch minimiert werden. Dies ist ein Ergebnis der bereits im Jahr 2015 veröffentlichten VDE ETG Studie „Der zellulare Ansatz – Grundlage einer erfolgreichen, regionenübergreifenden Energiewende“ [87].

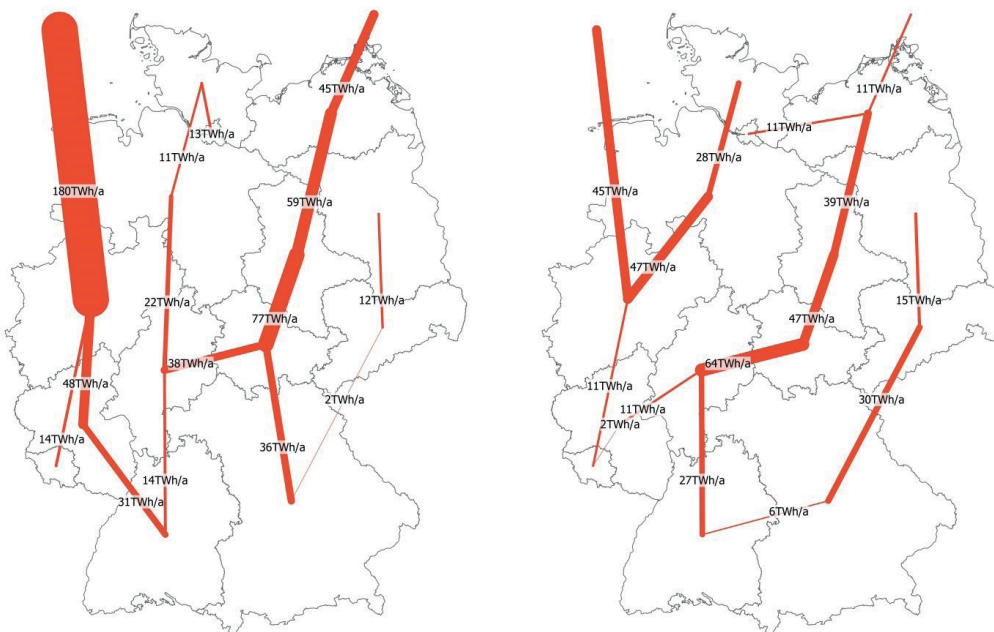


Abbildung 25: Nutzung verfügbarer erneuerbarer Energieressourcen auf die benötigte Transportkapazität von Nord nach Süd; links wie bisher geplant, rechts bei vollständiger Nutzung von lokal vorhandenen erneuerbaren Energieressourcen (Quelle: [87])

Abbildung 25 zeigt die Auswirkungen der Nutzung von lokal vorhandenen erneuerbaren Energieressourcen auf die benötigte Transportkapazität von Nord nach Süd. Weitere Details können der Studie entnommen werden.

Eine zuverlässige Versorgung mit Energie erfordert – bedingt durch die unstete Erzeugungseigenschaft von Windturbinen und Photovoltaik – Speicherkapazitäten. Bei zeitlich in etwa ausgeglichener Erzeugung und Verbrauch wird überwiegend das Stromnetz und Batterien als Kurzzeitspeicher genutzt. Das Gasnetz dient vorrangig der saisonalen Speicherung von großen Energiemengen für die erzeugungsferne Versorgung. Das dazu notwendige strom- und gasbasierte Verbundsystem bedingt heute noch nicht vorhandene neue Planungs- und Betriebsphilosophien. Diese gilt es zu entwickeln.

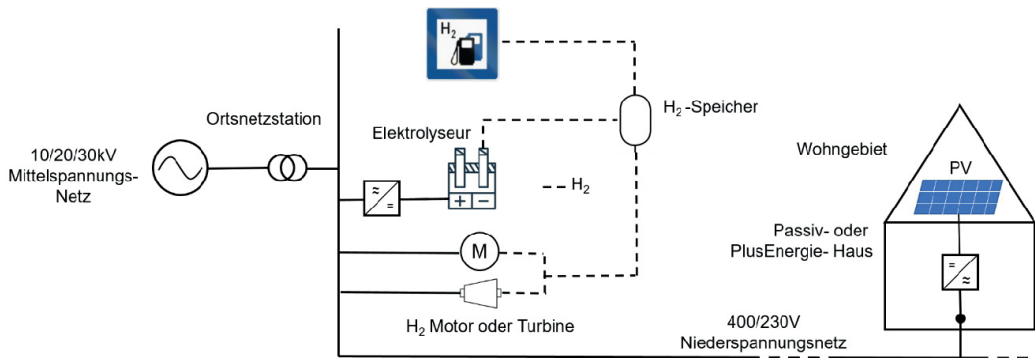


Abbildung 26: Beispiel einer strom- und gasbasierten Energiezelle für den Bereich einer Ortsnetzstation (eigene Darstellung)

Abbildung 26 zeigt ein Beispiel für eine strom- und gasbasierte **Energiezelle** in kleinem Maßstab, d. h. für den Bereich einer Ortsnetzstation in einem Wohngebiet. Dezentral auf den einzelnen Gebäuden ist jeweils Photovoltaik installiert. Bei passenden Randbedingungen kann auch eine kleine Windturbine von wenigen Kilowatt Leistung ergänzt werden. Auch die Möglichkeit von Kurzfrist-Speichern in Form von Batterien zur lokalen Eigenversorgung der Gebäude bzw. Zelle, z. B. während der Dunkelheit, ist möglich.

Zentral angeordnet ist der zentrale saisonale Wasserstoffspeicher mit einem Elektrolyseur sowie der Option zur Rückverstromung und Wärmeversorgung – idealerweise kombiniert als KWK-Anlage (Kraft-Wärme-Kopplung) mittels einer Wasserstoff-betriebenen Gasturbine, eines entsprechenden Gasmotors oder einer Brennstoffzelle. Optional kann eine Wasserstofftankstelle bedient werden für Privatfahrzeuge und/oder den öffentlichen Personennahverkehr.

Auch hier gilt der Grundsatz, dass bei in etwa zeitlich ausgeglichener Erzeugung und Verbrauch das Stromnetz und Batterien als Kurzzeitspeicher genutzt werden. Das Gasnetz dient vorrangig der längerfristigen Speicherung von Energie.

## 2.2 Energieerzeugung

### 2.2.1 Übersicht

Entsprechend den vorhandenen Möglichkeiten in Deutschland sind nach den Beschlüssen zur Klimaneutralität im Jahr 2045 folgende Technologien in Betracht zu ziehen:

- Wind, Onshore und Offshore,
- Photovoltaik (PV), in der Fläche und dach- sowie fassadengestützt,
- Geothermie, mit verschiedenen Technologien entsprechend der lokalen Verhältnisse,
- Wasserkraft, in diesem Zusammenhang ausschließlich Laufwasser und
- thermische Kraftwerke mit biogenen oder synthetisch hergestellten Brennstoffen.

Aufgrund der volatilen Erzeugungseigenschaft von Wind und PV und dem damit möglichen Teil- oder Totalausfall der dominierenden Ressourcen insbesondere in der kalten Jahreszeit, vereinfacht beschrieben mit dem Begriff „**Dunkelflaute**“, sind Energiespeicher in der Zukunft unentbehrlich und werden eine systemrelevante Rolle für eine zuverlässige Versorgung spielen. Beim Entladen sind diese Speicher den Energieerzeugern zuzuordnen und deshalb hier aufgeführt. Sie stellen aber beim Laden eine flexible Last dar und werden zusätzlich auch im Kapitel „Integrierte Energieversorgung“ angesprochen. Die verschiedenen Arten und Größen von Speichern werden weiter unten aufgezeigt.

Aus heutiger Sicht und bezogen auf die vorhandenen Ausbaupläne werden die beiden erstgenannten Technologien, nämlich Windenergie und Photovoltaik den größten Teil der Energieerzeugung übernehmen. Wichtig ist dabei zu erwähnen, dass Wind und PV eine komplementäre Erzeugungseigenschaft aufweisen. Im Sommer spielt PV eine größere Rolle, im Winter dagegen die Windenergie.



Ein weiterer wichtiger Aspekt für das zukünftige Energiesystem ist die erwartete technische Lebensdauer der Anlagen, nicht zu verwechseln mit der wirtschaftlichen Förderungsdauer. Sowohl beim Wind als auch bei der Photovoltaik geht man davon aus, dass die durchschnittliche Lebensdauer nicht wesentlich größer als 25 Jahre sein wird. Mit anderen Worten bedeutet das, dass alle heutigen Erzeugungsressourcen im Jahr 2050 nicht mehr im Einsatz sind bzw. durch modernere und effizientere Anlagen ersetzt wurden.

### 2.2.2 Windenergie

Für das Energiesystem 2050 wird die Windenergie eine führende Energiequelle sein. Dabei sind sowohl **Offshore-Anlagen**, also auf dem Meer fest installierte oder schwimmende Windturbinen als auch auf dem Land befindliche **Onshore-Windturbinen** zu berücksichtigen. Insgesamt waren Ende 2020 in Deutschland Onshore etwas mehr als 53 GW sowie Offshore fast 8 GW in Betrieb.

Um der vorhergesagten Lastentwicklung zu genügen, wird sich die Anzahl von Windturbinen erheblich vergrößern. Die Aufteilung zwischen den beiden Grundausführungen hängt stark von der Grundstruktur des Energiesystems, gemeint ist hier der Grad der Dezentralität, sowie anderen Faktoren wie Akzeptanz durch die Bevölkerung und Umweltschutz z. B. im Wattenmeer, ab. Die letztgenannten Aspekte sollen aber hier nicht weiter betrachtet werden.

Technisch ist davon auszugehen, dass über die nächsten Jahrzehnte die Größe einzelner Windturbinen zunimmt. Das betrifft sowohl die Baugröße selbst wie z. B. der Durchmesser der Rotoren und die Höhe der Masten als auch die elektrische Leistung. Die beträgt heute im Durchschnitt aller installierten on-shore Systeme etwa 2 MW, bei neu installierten Anlagen etwa 3,5 MW und in der Spitze 7-8 MW. Man nimmt an, dass es zukünftig Windturbinen bis 15 MW oder sogar darüber hinaus geben wird. Bedingt durch die größere Leistung, muss die innerhalb der Windenergieanlage zum Einsatz kommende Spannungsebene angepasst aber auch eine geeignete Spannungsebene für den Netzanschluss gewählt werden. Dies ist u. a. ein wichtiger Aspekt beim sogenannten **Repowering**, auf das weiter unten eingegangen wird.



Abbildung 27: Windenergieanlagen (Quelle: RMS)

#### Windenergie

Die Windenergie wird neben der Photovoltaik im Jahr 2050 wesentlich das Energiesystem prägen. Ihre Anzahl wird sich – verbunden mit einer Leistungssteigerung gegenüber heute – erheblich vergrößern. Die Aufteilung zwischen Onshore- und Offshore-Ausführungen wird stark von der angestrebten Grundstruktur des Energiesystems u. a. vom Grad der Dezentralität abhängen.

### 2.2.3 Photovoltaik (PV)

Nach der im vorangegangenen Abschnitt behandelten Windenergie, wird die Photovoltaik ebenfalls eine wichtige, wenn nicht sogar die wichtigere Rolle spielen. Ein Grund könnte die insgesamt höhere Akzeptanz sein. Auch hier ist prinzipiell zwischen zwei Ausführungsformen und -größen zu unterscheiden.

Auf Dächern und Fassaden montierte Anlagen, sei es auf Wohnhäusern oder kommerziell genutzten Gebäuden, werden Anlagengrößen von wenigen Kilowatt bis zu einstelligen Megawatt (MW) erreicht. In der Fläche aufgestellte Solarparks erreichen dagegen über 100 MW, in anderen Teilen der Welt sogar über zwei Gigawatt (GW).



Abbildung 28: Photovoltaikanlage auf dem Dach eines Wohnhauses (Quelle: RMS)

Insgesamt waren Ende 2020 etwa 53 GW Photovoltaik in Deutschland installiert. Die durchschnittlichen Wirkungsgrade betragen dabei abhängig von der eingesetzten Technologie zwischen 15-22 %.

#### Infobox Zukünftige Photovoltaik

Perowskit-Solarmodule sind aktuelle Entwicklungen von Dünnschicht-PV mit Schichtdicken von wenigen hundert Nanometern. Im Labor erreichen sie Wirkungsgrade von inzwischen über 20 %. Aufgrund des geringen Materialverbrauchs sind sie günstig herzustellen und für großflächige Anlagen geeignet. Am Ersatz von Blei bei der Herstellung wird gearbeitet.

Konzentrator-Photovoltaik (Concentrated Photovoltaics, CPV) besteht aus mehreren Materialschichten, die unterschiedliche Spektren des Sonnenlichts ausnutzen. Ihr eigentlicher Vorteil liegt aber am Einsatz optischer Elemente wie Linsen zur Konzentration des Lichts. Im Labor werden Wirkungsgrade größer 40 % erreicht.

Es ist bereits heute abzusehen, dass sich die durchschnittlichen Wirkungsgrade neu installierter PV-Anlagen erhöhen. Dazu werden neue Materialien bzw. Materialkombinationen wie Perowskit und andere Bauweisen, wie z. B. über optische Elemente konzentrierte Photovoltaik (CPV), beitragen.

Aber auch neue, heute noch nicht kommerziell verfügbare PV-Module werden im Einsatz sein. Dazu zählen beispielsweise PV-Module auf der Basis organischer Stoffe.

Zur Deckung des Energiebedarfs mittels Photovoltaik werden ähnlich wie bei der Windenergie gegenüber heute erheblich mehr Anlagen benötigt. Überarbeitete Bauvorschriften zur Gestaltung der Dachflächen von Gebäuden können eine umweltverträgliche Lösung darstellen.

### Photovoltaik

Neben der Windenergie wird die Photovoltaik im Energiesystem 2050 eine bzw. die dominierende Rolle übernehmen. Neue Auflagen zur Gestaltung von Dachflächen auf Gebäuden könnte das umweltverträglich unterstützen. Neue PV-Module werden verbesserte Wirkungsgrade und weitere Einsatzmöglichkeiten bieten. Die Aufteilung zwischen dachgestützten und in der Fläche aufgestellten Anlagen wird u. a. auch von regulatorischen Rahmenbedingungen und neuen Geschäftsmodellen geprägt werden. Mehr dazu in den entsprechenden Kapiteln.

#### 2.2.4 Geothermie bzw. Erdwärme

Im Gegensatz zur Windenergie und Photovoltaik werden geothermische Systeme bei der Erzeugung elektrischer Energie eine untergeordnete Rolle im Energiesystem 2050 spielen. Das liegt im Wesentlichen an den geologischen Gegebenheiten in der Bundesrepublik Deutschland. Zurzeit sind Anlagen im Norddeutschen Becken, im Molassebecken in Süd-Bayern sowie in der Oberrheinischen Tiefebene und im Oberrheingraben mit einer thermischen Gesamtleistung von etwa 350 MW zu finden. Die installierte elektrische Leistung beträgt etwas mehr als 40 MW.

Als Vorteil geothermischer Anlagen zur Stromerzeugung ist ihre ständige Verfügbarkeit zu nennen. Sie stellen eine verlässliche Energiequelle dar und können bei einem **Schwarzstart** eine wichtige Rolle spielen. Prinzipiell zählen aber auch Wärmepumpen, soweit sie mit Erdwärme betrieben werden, zu den geothermischen Anlagen. Bei der Erzeugung elektrischer Energie spielen sie aber keine Rolle und werden an dieser Stelle nicht weiter behandelt.



Abbildung 29: Geothermieanlage in Island (Quelle: RMS)

### Geothermie

Aufgrund der geologischen Gegebenheiten in Deutschland werden geothermische Anlagen im Energiesystem 2050 eine Nebenrolle spielen. Vorteilhaft ist ihre zuverlässige Verfügbarkeit, die bei einem Schwarzstart hilfreich sein kann.

#### 2.2.5 Wasserkraft

In Deutschland gibt es aktuell etwa 7.300 Wasserkraftanlagen mit einer installierten Gesamtleistung von etwa 5,6 Gigawatt (GW).

Die Anzahl der sogenannten Kleinwasserkraftanlagen, das sind Anlagen mit einer Leistung kleiner 1 Megawatt (MW), beträgt 6.900 Anlagen, davon 5.300 Anlagen mit einer Leistung kleiner 100 kW und damit 94 % bezogen auf die Gesamtzahl. Die Stromproduktion der Kleinwasserkraftanlagen beträgt aber nur etwa 14 % von insgesamt 17,5 TWh pro Jahr. Insgesamt tragen Wasserkraftanlagen aktuell weniger als 4 % zur jährlichen elektrischen Energieerzeugung bei.

Ein Vorteil von Wasserkraftanlagen ist ihre zuverlässige Verfügbarkeit, ähnlich wie bei geothermischen Kraftwerken. Allerdings schwankt diese durch unbeständige Niederschlagsmengen in den letzten Jahren erheblich und diese Schwankungen können bedingt durch den Klimawandel zunehmen.

Grundsätzlich können auch die 31 Pumpspeicherwerke in Deutschland den Wasserkraftwerken zugeordnet werden. Da sie im Wesentlichen die Funktion eines Energiespeichers erfüllen, werden sie an dieser Stelle nicht weiter behandelt.

### **Wasserkraft**

Aufgrund der gegebenen hydrologischen Verhältnisse spielt die Wasserkraft bei der Energieversorgung in Deutschland auch in Zukunft eine geringe Rolle. Laufwasser und die vorhandenen hydrologischen Möglichkeiten sind weitgehend genutzt und erlauben keine wesentlichen Kapazitätswachse. Sie stehen aber weiterhin zur Verfügung.

### **2.2.6 Biogas und nachwachsende Rohstoffe**

Biogasanlagen erzeugen durch die natürliche Zersetzung von organischem Material wie Gülle, Bioabfällen z. B. Holz- und Grünschnitt sowie angebauten Energiepflanzen unter Luftabschluss in sogenannten Fermentern Biogas. Dies besteht zu maximal 65 % aus brennbarem Methan ( $\text{CH}_4$ ). Es kann in einem thermischen Kraftwerk zu Strom und Wärme gewandelt werden. Das gewonnene Gas kann entweder lokal gespeichert oder nach entsprechender Aufbereitung zu sog. Biomethan in das vorhandene Gasnetz eingespeist werden. Ein Einsatz als Treibstoff ist ebenfalls möglich.

Das Gärprodukt selbst ist ein wertvoller Rohstoff und kann u. a. als organischer Dünger oder Bodenverbesserer in der Landwirtschaft genutzt werden.

Das Bio im Namen weist lediglich auf die biotische Entstehung nicht aber auf eine Herkunft aus einer ökologischen und nachhaltigen Landwirtschaft hin. In diesem Zusammenhang ist es wichtig, auf anhaltende Diskussionen um den Einsatz von Nahrungsmitteln zur Energiegewinnung hinzuweisen. Darauf wird aber in diesem Zusammenhang nicht weiter eingegangen.

Deutschlandweit gab es im Jahr 2019 rund 9.000 Biogasanlagen mit einer theoretischen elektrischen Leistung von etwa 5.000 MW. Davon waren aber nur 3.800 MW relevant für die Energiewandlung.

Heute werden Biogas-Blockheizkraftwerke (BHKW) überwiegend unflexibel betrieben. Aufgrund der guten Speicherfähigkeit des Biogases ist jedoch davon auszugehen, dass diese Anlagen zunehmend flexibilisiert werden, um Mangelsituationen bei PV und Wind auszugleichen. Auch bei konstantem Biomasseaufkommen kann somit die Leistung der Anlagen gesteigert werden, sofern die regulatorischen Rahmenbedingungen einen wirtschaftlichen Betrieb ermöglichen.

Im zukünftigen Energiesystem wird man weiterhin Biogasanlagen finden. Durch natürlich anfallende Abfälle als Ausgangsprodukt steht genügend Material zur Verfügung.

Nachwachsende Rohstoffe können nicht nur in Biogasanlagen fermentiert werden, sondern auch flüssige Brennstoffe liefern. Beispiele hierfür sind Raps und – in unseren Breiten nicht vertreten – die Jatropha-Pflanze, auch bekannt als Purgniernuss. Diesen Pflanzen ist gemein, dass sie gepresst werden und die gewonnene Flüssigkeit als Treibstoff entweder exklusiv oder als Beimischung verwendet werden kann. Der dabei entstehende Presskuchen kann u. a. als Tierfutter weiterverwendet werden.

Des Weiteren können biogene Feststoffe wie beispielsweise Scheitholz, Holzhackschnitzel oder Pellets auch direkt in einem Kraftwerk – idealerweise mit Kraft-Wärme-Kopplung – genutzt werden.

### **Biogas und nachwachsende Rohstoffe**

Biogasanlagen haben eine oftmals kleine Leistung von bis zu 150 kW. Sie können aber in Zukunft bei dezentralen zellularen Strukturen des Energiesystems eine zunehmend wichtige Rolle als lokale Energiespeicher und Erzeugungseinheiten für Strom und Wärme spielen. Im Sinne einer durchgängigen und konsequenten Kreislaufwirtschaft und auf der Basis biologischer Abfälle ist der weitere Einsatz bzw. Ausbau wünschenswert.

#### **Wichtiger Hinweis zum Thema nachwachsende Rohstoffe:**

Pflanzen als Energiequelle sind hoch umstritten. Da Anbauflächen begrenzt sind, stehen für Biogas angebaute Pflanzen in direkter Konkurrenz zu Nahrungsmitteln.

Bei der Verbrennung von Feststoffen wie Scheitholz oder Pellets werden neben Treibhausgasen Luftschadstoffe emittiert, welche Gesundheits- und Umweltschäden zur Folge haben können.

Die Nutzung von Biomasse kann nur dann als klimafreundlich angesehen werden, wenn höchstens genau so viel genutzt wird, wie in der gleichen Zeit nachwachsen kann. Dies gilt es im Vergleich zu heute schärfer zu kontrollieren und zertifizieren

#### **2.2.7 Repowering**

Technische Anlagen haben eine geplante Lebensdauer, die gegebenenfalls verlängert werden kann. Aber auch der umgekehrte Fall ist möglich, wie der laufende Ausstieg aus der Kernenergie in Deutschland zeigt.

Erneuerbare Energieanlagen wie Wind und Photovoltaik unterliegen nach wie vor einer fortlaufenden, zum Teil dynamischen technischen Entwicklung. Dies führt wie bereits erwähnt zu größeren Komponenten und Anlagengrößen aber auch zu höheren Wirkungsgraden.

Bei beiden Technologien geht man von einer geplanten Lebensdauer von 20-25 Jahren aus. Im Klartext bedeutet das, dass alle heute existierenden Anlagen nicht ohne weiteres das Jahr 2050 erleben werden.

Dies trifft aber nur bedingt auf die notwendige Infrastruktur wie den Netzanschluss oder aber auch auf die genehmigte Örtlichkeit zu. Letztgenannter Aspekt hat rechtliche Aspekte und wird hier nicht weiter behandelt bzw. als gegeben vorausgesetzt.

Bezugnehmend auf die in den vorangegangenen Kapiteln beschriebene technische Entwicklung bei der Windenergie und der Photovoltaik muss man davon ausgehen, dass sich die Dichte, d. h. installierte Leistung bzw. Erzeugung pro betrachteter Fläche zukünftig erheblich vergrößern wird und somit einen höheren Anteil zur Zielerreichung der Energiewende beitragen kann.

#### **Repowering**

Bedingt durch den technischen Fortschritt u. a. durch größere Einheiten und verbesserte Wirkungsgrade wird die Energiedichte zunehmen und sich in ihrer Energiebilanz positiv auf die Energiewende auswirken.

Regulatorische Rahmenbedingungen müssen dazu angepasst werden, um diese Möglichkeit zu unterstützen.

## **2.3 Integrierte Energieversorgung**

### **2.3.1 Einführung**

Unter der Energiewende wird oftmals nur die elektrische Energiewende und damit u. a. der Ersatz von fossilen und kerntechnischen Erzeugungsanlagen durch Erneuerbare verstanden. Neben der elektrischen Energiewende gibt es aber auch die Wärmewende und die Verkehrswende. Diese werden teilweise losgelöst und getrennt voneinander betrachtet. Die damit erzielbaren Teilergebnisse sind aber suboptimal im Sinne einer Reduzierung des CO<sub>2</sub>-Ausstoßes.

Sektorenkopplung beschreibt im Prinzip eine gesamtheitliche Betrachtung des zukünftigen Energiesystems unter Nutzung von Synergien von allen beteiligten Bereichen. Dies betrifft nicht nur den Betrieb von Anlagen, sondern auch die gesamtheitliche Planung und Optimierung sowie mögliche Wechsel der eingesetzten Energiearten wie z. B. bei der Elektromobilität.

Bedingt durch die volatile Erzeugungscharakteristik der Mehrheit der eingesetzten Ressourcen, insbesondere der Windenergie und der Photovoltaik, ist eine andere Grundphilosophie im zukünftigen Energiesystem notwendig. Bisher wurde Energie nahezu grenzenlos und jederzeit bereitgestellt, um den aktuellen Bedarf zu decken, unabhängig vom Wetter, von Tages- und Jahreszeit. Das wird als „**verbrauchsorientierte Erzeugung**“ bezeichnet.

Steht nicht immer die aktuell benötigte Energie zur Verfügung, muss umgedacht werden. Bezogen auf die notwendige Balance zwischen Erzeugung und Verbrauch bedeutet das, den „**erzeugungsorientierten Verbrauch**“ zu stimulieren. Oder im Klartext: Energie in welcher Form auch immer sollte möglichst dann genutzt werden, wenn sie zur Verfügung steht. Als mögliche Maßnahmen zum Ausgleich, wenn dies direkt nicht möglich ist, gelten die Laststeuerung, auch bekannt unter dem Begriff Demand-Side-Integration und der Einsatz von Energiespeichern. Beides wird im Folgenden u. a. beschrieben.

### 2.3.2 Laststeuerung

Ein wichtiges Instrument zur Optimierung des Einsatzes von erneuerbaren Energien ist die Laststeuerung, im Englischen unter dem Begriff **Demand-Side-Integration** zusammengefasst. Damit unterstützt man wie eingangs beschrieben die geänderte Grundphilosophie des erzeugungsorientierten Verbrauchs.

Prinzipiell wird zwischen zwei verschiedenen Arten der Laststeuerung unterschieden. Beim **Demand-Side-Management** hat der Stromlieferant nach genereller Erlaubnis durch den jeweiligen Verbraucher die Möglichkeit, Lasten bei Bedarf ein- oder auszuschalten. Damit kann der Leistungsfluss der lokal vorhandenen Netzkapazität bzw. der Energiebedarf der aktuellen Erzeugungssituation angepasst werden. Der Verbraucher ist dabei nicht aktiv tätig und profitiert mit vorher verhandelten finanziellen Vorteilen.

Beim sogenannten **Demand-Response-Verfahren** stellt der Stromlieferant bzw. der Netzbetreiber Informationen in Form von Preissignalen für den aktuellen Energiebezug zur Verfügung. Gemäß dem Angebot/Nachfrage-Prinzip bedeutet das, dass bei Netzengpässen bzw. Energieknappheit der Preis steigt, bei einem Überangebot bei gleichzeitig ausreichender Netzkapazität entsprechend fällt. Es liegt dann beim Verbraucher bzw. bei einem programmierten Gerät, wie z. B. einer Waschmaschine zu entscheiden, was gemacht werden soll. Man geht davon aus, dass höhere Energiepreise den Bedarf drosseln, wohingegen niedrige Energiepreise den Verbrauch steigern können.

Erste Erfahrungen mit solchen Verfahren wurden bereits in den siebziger Jahren des letzten Jahrhunderts mit der Elektroheizung gemacht. Damals war das Ziel, den niedrigeren Verbrauch in der Nacht bzw. die Grundlast zu erhöhen, um damit den Betrieb von Braunkohle- und Kernkraftwerken zu vergleichmäßigen.

Im zukünftigen Energiesystem wird aufgrund des hohen Anteils von erneuerbaren Ressourcen der Laststeuerung eine wachsende Bedeutung zukommen. Es ist davon auszugehen, dass in Haushalten energiestarke Verbraucher wie Waschmaschinen, Geschirrspüler, Wärmepumpen oder Kühlgeräte automatisch nach vorher durch den Verbraucher festlegbaren Regeln handeln und damit die Kosten für den Energiebezug senken können. Die lokale Steuerung kann auch an einen Dienstleister übertragen werden. Diese Rolle wird auch als **Aggregator** bezeichnet. Diese betreiben heute **Virtuelle Kraftwerke**. Das beschreibt einen Verbund von überwiegend erneuerbaren Ressourcen, flexiblen Verbrauchern und Energiespeichern. Ihr Geschäftsmodell folgt der Regel „kaufe günstig und verkaufe teuer“.

Laststeuerung wird auch in der Industrie und hier überwiegend bei energieintensiven Betrieben praktiziert. Auf der Basis von Sonderverträgen bei der Versorgung mit elektrischer Energie stehen erheblich größere Kapazitäten für Lastverschiebungen zur Verfügung als im Privatkundenbereich. Dies wird bereits seit vielen Jahren genutzt und bietet ebenfalls finanzielle Vorteile für die Unternehmen. Beispiele findet man u. a. in der chemischen Industrie, bei Kühlhäusern und bei Zementwerken. Im Gegensatz zu den privaten Verbrauchern ist hier für die Laststeuerung ein erhebliches Volumen bereits realisiert. Neue Möglichkeiten können sich durch Überarbeitung der Prozesse hin zu mehr Flexibilität beim Energieverbrauch ergeben.

In diesem Zusammenhang wird auch oft der Begriff „Negawatt“ benutzt. Er kennzeichnet Lasten, die durch Ausschalten den Leistungsbedarf zeitweise verringern, ohne sich negativ auf die Prozesse auszuwirken. In der Regel muss die während dieses Zeitraums nicht gelieferte Energie jedoch zu einem späteren Zeitpunkt nachgeliefert werden. Art und Weise der Vergütungen kann vielfältig sein und wird sicherlich in der Zukunft einige Neuerungen bringen.

### **Laststeuerung**

Laststeuerung ist ein wichtiges Instrument der Energiewende und dient der Anpassung der aktuellen Last an die momentan vorhandene Erzeugungsleistung. Sie findet sowohl bei privaten Verbrauchern wie auch bei Handel, Gewerbe und im Dienstleistungssektor sowie in der Industrie statt.

Auch wenn die steuerbaren Lasten im Haushalt mit wenigen Kilowatt gering ausfallen, können sie beim zellularen Ansatz auf Gebäude- und/oder Quartiersebene eine wichtige Rolle übernehmen und einen wichtigen Beitrag zur Systemführung beitragen. Das gleiche gilt für gewerbliche und industrielle Lasten im größeren Stil.

Die Ausführung findet entweder durch vereinbarte Mechanismen automatisch statt, bietet aber auch für Marktteilnehmer wie z. B. Aggregatoren neue Betätigungsfelder. Es ist davon auszugehen, dass u. a. durch erhöhte Dezentralität sich eine Vielzahl neuer Marktteilnehmer mit neuen Geschäftsmodellen etablieren werden. Damit sich die Energieendverbraucher daran beteiligen, müssen diese jedoch davon auch profitieren.

### **2.3.3 Energiespeicher**

Wie bereits mehrfach aufgezeigt, zeichnet sich das zukünftige Energiesystem durch mehr Volatilität bei der Erzeugung und einen hohen Grad von Dezentralität aus. Der mögliche zellulare Ansatz bis hinunter auf Gebäude- oder Quartiersebene ist ein Beweis dafür.

Da der überwiegende Teil der Energieversorgung durch Windenergie und Photovoltaik stattfinden wird, kann per se eine kontinuierliche und zuverlässige Versorgung der Verbraucher ohne weitere Maßnahmen nicht gewährleistet werden. Auf die „Dunkelflaute“ wurde in diesem Zusammenhang bereits hingewiesen.

Energiespeicher, in welcher Form und welcher Größe auch immer, können Abhilfe schaffen. Die hier angestellten Überlegungen sind rein technischer Natur und behandeln keine Fragen der Wirtschaftlichkeit.

Technisch unterscheidet man zwischen elektrischen, thermischen, chemischen und mechanischen Speicherprinzipien, wobei im Rahmen von Sektorenkopplung nicht nur Speicher zur Rückspeisung in das Stromnetz betrachtet werden. Eine vollständige Beschreibung der verschiedenen Formen würde den hier gesetzten Rahmen sprengen. Stattdessen sollen nur einige Beispiele kurz vorgestellt und ihre Integration in das Gesamtsystem aufgezeigt werden. Generell ist anzumerken, dass sich das Gebiet der Energiespeicher durch eine hohe Dynamik und Innovationsrate auszeichnet. Dies wird auch in der Zukunft anhalten.

Betrachtet man ein einzelnes Gebäude wie ein Einfamilienhaus mit eigener PV-Anlage als kleinste mögliche Energiezelle, so kann ein Speicher in Form einer Batterie sinnvoll sein. Damit können Erzeugungsspitzen am Tag genutzt werden, um nachts die Verbraucher zu versorgen. Setzt man flexible Energiepreise voraus und geht davon aus, dass der Preis nachts höher ist, kann sich der Batteriespeicher über die Zeit für den Eigenheimbesitzer amortisieren. Ergänzend können PV-Überschüsse auch in einem Warmwasserspeicher gespeichert werden, um z. B. die Erwärmung von Trinkwasser zu gewährleisten. Damit lassen sich fossile Energieträger entsprechend substituieren.

Nimmt man den Bereich eines Ortsnetzes als Energiezelle an, so kann entweder zusätzlich zu den gebäudeintegrierten Batteriespeichern aber auch als Alternative ein zentraler Energiespeicher auf Wasserstoffbasis mit Elektrolyseur und Rückverstromung mittels Wasserstoffmotor, Brennstoffzelle oder Gasturbine zum Einsatz kommen. Der erzeugte und in Druckbehältern gespeicherte Wasserstoff kann zusätzlich direkt als Treibstoff für Fahrzeuge genutzt werden. Bei entsprechender Auslegung der Anlage, insbesondere der Speichergröße im zweistelligen MWh-Bereich, kann damit auch ein saisonaler Speicher realisiert werden. Ein entsprechendes Beispiel wurde im ersten Kapitel bereits beschrieben. Die bei der Elektrolyse und bei der Rückverstromung anfallende Wärme kann ggf. ebenfalls genutzt und/oder gespeichert werden.

Für regionale oder sogar landesweite saisonale Speicherlösungen kommen aus heutiger Sicht ausschließlich Gasspeicher in Betracht. Sie speichern den vorwiegend in zentralen Elektrolyseuren erzeugten Wasserstoff in großen Kavernen. Diese Speicher sind Teil des Transportnetzes und versorgen z. B. Gasturbinen oder Gas-und-Dampf (GuD)-Kraftwerke für die Rückverstromung. Diese Speicher werden Kapazitäten von mehreren GWh bis TWh haben. Alternative Speicherlösungen mit synthetisch

hergestellten Gasen wie Methan sind eventuell in der Übergangszeit denkbar, allerdings bei einem niedrigeren Wirkungsgrad.

Bei Speicherlösungen muss berücksichtigt werden, dass sich das Investment für die Speicherlösung durch den flexiblen Strompreis bzw. durch die Differenz der nicht bezogenen, sondern gespeicherten und selbst erzeugten Energie rentiert oder durch die Differenz von Einkauf und Verkauf ergibt. Eine größere Volatilität der Preise und sinkende spezifische Gestehungskosten der eigenen Strom-Erzeugungsanlage und des Speichers sind bei der Amortisationszeit zu berücksichtigen. Ausgenommen davon sind die großen Gasspeicher im Transportnetz, da diese systemrelevant sind. Hierfür müssen im Sinne einer „nationalen Reserve“ für Krisenzeiten andere Konditionen gelten, da es hierfür aktuell kein Geschäftsmodell gibt [88].

### Energiespeicher

Das Energiesystem der Zukunft weist aufgrund der erneuerbaren Energieerzeugung eine hohe Volatilität auf. Unter der Voraussetzung einer zuverlässigen Energieversorgung ist der Einsatz von Speichern unabdingbar.

Für Art und Größe der Speicher gibt es keine generelle Lösung. Je nach betrachteter Systemstruktur können verschiedene Technologien zum Einsatz kommen. Wenn alle heute existierende Lösungen einschließlich neuer Entwicklungen in Anspruch genommen werden, kann man sich eine 100 % Versorgung Deutschlands mit erneuerbarer Energie in einem strom- und gasbasierten Verbundsystem vorstellen.

Dafür sind aber weitere technische Entwicklungen sowie Änderungen im regulatorischen Rahmenwerk notwendig.

### 2.3.4 Effizienz

Die Möglichkeit der Energieeinsparung und Effizienzsteigerung werden von vielen nur als Randthema der Energiewende gesehen. Durch konsequente Umsetzung von Effizienzmaßnahmen kann prinzipiell jedoch der Bedarf für den Ausbau erneuerbarer Energien reduziert werden. Dabei gibt es erhebliche Potentiale auf die u. a. auch in den Kapiteln „Wärmewende“ und „Verkehrswende“ eingegangen wird. Hier soll zunächst nur auf die Möglichkeiten von elektrischen Verbrauchern eingegangen werden.

Mit Stichtag 1. März 2021 wurde in der Europäischen Union (EU) ein überarbeitetes Energielabel eingeführt. Es ist zunächst für die Verbrauchsgruppen Kühl- und Gefriergeräte inkl. Weinlagerschränke, Geschirrspüler, Waschmaschinen inkl. Wäschetrockner sowie Elektronische Displays inkl. Fernsehgeräte gültig. Es umfasst die Klassen A bis G. Ab September 2021 wurde der Gültigkeitsbereich auf Lichtquellen ausgeweitet. Es ist geplant bis 2030 alle relevanten Produktgruppen zu adressieren.

Die Umstellung war notwendig nachdem erhebliche Verbesserungen in den letzten Jahren erreicht wurden und sich fast alle Geräte in den obersten Effizienzklassen befanden. Das machte eine Unterscheidung für die Verbraucher schwierig bis unmöglich. So wird beispielsweise eine Kühl-/Gefrierkombination der neuen Klasse „C“ zugeordnet, die vorher mit dem Label „A+++“ ausgezeichnet war.

Neben der besseren Übersichtlichkeit für den Verbraucher soll das neue Energielabel auch Ansporn für die Industrie sein, weitere Verbesserungen an den Geräten voranzutreiben und damit aktiven Umweltschutz mit CO<sub>2</sub>-Reduzierung zu betreiben.

Geht man kurz- und mittelfristig von steigenden Energiepreisen aus, so rechnet sich der geringere Verbrauch in der üblichen Nutzungsdauer.

Auch im industriellen Bereich gibt es große Potenziale für Energieeinsparungen und Effizienzsteigerungen. Die können beispielhaft durch Nutzung von Abwärme, neue Heizquellen aber auch Prozessanpassungen erreicht werden. Eine detailliertere Analyse ist im Rahmen dieser Untersuchung nicht möglich und muss branchenspezifisch von den entsprechenden Experten durchgeführt werden.



## Effizienz

Effizienzsteigerungen sowohl im privaten als auch im kommerziellen und industriellen Umfeld verringern den Energieverbrauch und führen zu geringeren, über die Nutzungsdauer von Geräten und Anlagen gerechnete Kosten.

Durch das neue EU-Energielabel, das schrittweise ab 1. März 2021 eingeführt wird, soll die Übersichtlichkeit für Verbraucher verbessert werden. Zusätzlich sollen damit auch Anreize für die Industrie gesetzt werden, weitere Effizienzverbesserungen zu realisieren.

### 2.3.5 Verkehrswende

Will man die Verkehrswende mit einem Satz beschreiben so würde dieser wie folgt lauten. Die Verkehrswende ist elektrisch und hoch automatisiert. Zusätzlich wird sie mit der breiten Einführung von elektrischen Fahrzeugen den Primärenergiebedarf senken. Was dies für die verschiedenen Bereiche bedeutet soll in diesem Kapitel aufgezeigt werden.



Abbildung 30: Batterieelektrisches Fahrzeug beim Ladevorgang (Quelle: Mikes-Photography / Pixabay)

Für den Bereich von Personenkraftwagen und überwiegend auch für Kleinlastwagen, auch als Sprinter-Klasse bekannt, ist das Ende der Verbrennungsmotoren abzusehen. Was in einigen Ländern Europas wie z. B. Norwegen bereits beschlossene Sache ist, zeichnet sich auch in Deutschland ab. Viele Automobilhersteller haben inzwischen verkündet, nach 2030 keine Verbrennungsmotoren mehr anzubieten. Was aber nicht bedeutet, dass wir dann kein Benzin oder Diesel mehr benötigen. Bei einer durchschnittlichen Nutzungsdauer von Pkw, Oldtimer einmal ausgenommen, von 12 Jahren kann man davon ausgehen, dass wir im Jahr 2050 vollständig auf Elektromobilität umgestiegen sind.

Wie das technisch realisiert wird, kann hier nur kurz aufgezeigt werden und ist nicht im Fokus dieses Dokuments. Es ist aber davon auszugehen, dass batteriebasierte Fahrzeuge überwiegen werden. Fortschritte bei den verwendeten Materialien und der Leistungsdichte von Batterien sowie damit verbundener Ladeinfrastruktur werden das ermöglichen. In Konkurrenz zur Batterie steht Wasserstoff. Den Vorteilen bei der Reichweite und der Tankzeit stehen vergleichsweise die heute noch hohen Kosten und die fehlende Infrastruktur gegenüber. Insbesondere kann jedoch damit der Energie-/Leistungsbedarf bei der Betankung zeitlich entkoppelt und die Erzeugung von Wasserstoff an die EE-Verfügbarkeit angepasst werden. Damit steht Wasserstoff z. B. auch während einer „Dunkelflaute“ zur Verfügung.

Lastkraftwagen und der Schwertransport dagegen werden mit hoher Wahrscheinlichkeit mit wasserstoffbasierten Antrieben ausgerüstet werden. Das hohe Gewicht von Batterien und der Platzbedarf einerseits sowie die Reichweite andererseits werden dies treiben. Ob der Wasserstoff in Brennstoffzellen verstromt wird oder in entsprechend ertüchtigten Verbrennungsmotoren direkt eingesetzt wird, ist nicht endgültig entschieden. Da er aber durch Elektrolyse mit EE-Strom hergestellt werden wird, wird auch diese Fahrzeugkategorie klimaneutral.

Eine zurzeit mit zwei Teststrecken in Deutschland in Erprobung befindliche Alternative ist der **eHighway**. Aus Oberleitungen ähnlich denen des Bahnverkehrs beziehen Lkw ihre Energie. Auf Autobahnen können sie direkt damit fahren und/oder ihre Batterien für Strecken ohne Oberleitungen aufladen. Der Aufwand für die entsprechende Infrastruktur sowie die notwendigen Investitionen in die Fahrzeuge ist nicht unerheblich. Zusätzlich müsste hier eine Standardisierung herstellerübergreifend vorangetrieben werden.



Abbildung 31: Lastkraftwagen auf der eHighway Teststrecke (Quelle: RMS)

Der öffentliche Personennahverkehr (ÖPNV) soweit er schienengebunden ist, ist heute bereits weitgehend elektrisch. Auch im Kurzstreckenverkehr kommen vermehrt batterie- oder brennstoffzellenbasierte Fahrzeuge auf den Markt.

In Zukunft werden U-, S- und Straßenbahnen durch elektrische Busse mit Batterien ergänzt. Diese können auch mit Wasserstoff und Brennstoffzellen betrieben werden. Beide Lösungen sind bereits heute erfolgreich im Einsatz.

Als zusätzliche Alternative kommt auch der Einsatz von **urbanen Standseilbahnen** in Frage. Vorteilhaft ist dabei die Nutzung vorhandener Trassen, nämlich die Straßen, kurze Bauzeiten und vergleichsweise niedrige Kosten. Punkt-zu-Punkt-Verbindungen erreichen Transportkapazitäten bis zu 6.000 Personen je Richtung und Stunde. Erste Lösungen gibt es u. a. in London sowie in Südamerika.

Neue Lösungen im innerstädtischen Bereich wie Elektroroller, Fahrräder – ob konventionell oder elektrisch angetrieben – und Lastenräder, verbunden mit ertüchtigter Infrastruktur auch für Fußgänger, werden zunehmen. Ihnen sind in der Zukunft keine Grenzen gesetzt. Die autofreundliche Stadt mit verstopften Straßen und Parkplatzproblemen ist endgültig Vergangenheit.

Im schienengebundenen Fernverkehr werden auch in Zukunft elektrische Antriebe dominieren. Nach Neubau oder Ertüchtigung der Fahrstrecken wird sich der Anteil von Hochgeschwindigkeitszügen auch jenseits von 300 km/h erhöhen. Eine in Deutschland entwickelte Alternative, von der sich deutsche Hersteller aber bereits verabschiedet haben, ist die Magnetschwebetechnik, auch als Transrapid bekannt. Sie ermöglicht Geschwindigkeiten von bis zu 500 km/h. Bisher ist eine Strecke in China in Betrieb.

Eine weitere Alternative ist die sogenannte Hyperloop. In teilvakuumierten Röhren verkehren unidirektional Kapseln mit Geschwindigkeiten von nahezu Schallgeschwindigkeit. Hier gibt es erste Teststrecken in Kalifornien.

Ob Transrapid oder Hyperloop eine Zukunft haben, hängt von der Bereitschaft ab, in eine weitere Infrastruktur parallel zum schienengebundenen Hochgeschwindigkeitsverkehr zu investieren. Aus heutiger Sicht werden diesen Alternativen in Deutschland nur geringe Chancen eingeräumt und sind damit nicht Bestandteil dieser Vision.

Auch dem innerdeutschen Flugverkehr wird langfristig keine Zukunft eingeräumt. Unter der Voraussetzung der Ertüchtigung und des Ausbaus des Streckennetzes für den Hochgeschwindigkeitsschieneverkehr wird er von diesem verdrängt werden.

International und interkontinental werden langfristig CO<sub>2</sub>-freie Antriebe den Luftverkehr prägen. Auch hier ist Wasserstoff eine Alternative parallel zu synthetisch hergestellten CO<sub>2</sub>-neutralen Treibstoffen. Ziel der internationalen Luftfahrt ist es bis 2050 ihren CO<sub>2</sub>-Ausstoß zu halbieren.

Bleibt abschließend noch der Schiffsverkehr zu betrachten. Für die Binnenschifffahrt und den küstennahen Verkehr speziell für Fähren, den Linienverkehr auf Seen sowie für touristische Zwecke gelten die gemachten Aussagen für den ÖPNV. Hier wird die Rolle der Batterie- und Wasserstoffantriebe bis 2050 stark zunehmen.

Die Hochseeschifffahrt wird im Rahmen dieses Dokuments nicht weiter betrachtet, da sie keinen unmittelbaren Einfluss auf die deutsche Energiewende hat. Wichtig ist darauf hinzuweisen, dass Hochseeschiffe innerhalb der deutschen Hoheitsgewässer strenge Auflagen zum Schadstoffausstoß haben und in Häfen eine Landstromversorgung in Anspruch nehmen müssen.

Wie eingangs erwähnt, ist die Verkehrswende elektrisch und hoch automatisiert. Der elektrische und damit technische Teil wurde beschrieben. Welchen Einfluss hat aber eine hohe Automatisierung auf unsere zukünftige Mobilität?

Beim Automobilverkehr sowohl bei Pkw als auch bei Lkw wird sich das autonome Fahren etablieren. Das heute verfügbare Level 3, d. h. hochautomatisiertes Fahren wird in absehbarer Zeit auf Level 5 weiterentwickelt. Im Klartext heißt das, alle Insassen werden falls vorhanden zu Passagieren.

In Verbindung mit überarbeiteten Shared-Car-Konzepten kann autonomes Fahren den ÖPNV entscheidend verändern. Innerstädtisch könnte das zunächst den fahrplanmäßigen Verkehr in passagierarmen Zeiten ersetzen und anschließend weiter ausgeweitet werden. Generell und speziell in ländlichen Gebieten würde das bedeuten, dass die Notwendigkeit eines eigenen Fahrzeugs an Bedeutung verliert und heute vorhandene Konzepte wie das Ruftaxi ersetzen könnte. Unabhängig vom Wohnort kann das zusätzlich die Mobilität von Personen ohne Fahrerlaubnis wie Jugendliche und allgemein von älteren Mitbürgern erheblich verändern.

Unabhängig vom Einsatzgebiet würde eine modalitäten-übergreifende IT-Plattform die Reservierung, Bereitstellung und Abrechnung des autonomen Fahrzeugparks übernehmen. Zusätzlich unterstützt diese dann auch den konventionellen Teil des ÖPNV wie Fahrplanung und Fahrscheinverkauf. Durch Nutzung vorhandener Near-Field-Kommunikationskonzepte könnte die Abrechnung des Fahrpreises dynamisiert werden. Entsprechend dem Prinzip „pay-as-you-go“ würde erst bei Nutzung eines Verkehrsmittels der Fahrpreis automatisch abgebucht.

Auch wenn es heute sehr futuristisch klingt, sagen einige Experten voraus, dass der Besitz von eigenen Pkw stark abnehmen wird. Dazu tragen verbesserte Konzepte von geteilten Fahrzeugen (shared cars), herstellerübergreifende Auto-Abonnements, d. h. verschiedene Typen von Fahrzeugen mit einem Vertrag zeitweise nutzen, und die nahtlose Integration der öffentlichen Verkehrsmittel in IT-Plattformen bei. Stellt man jeweils den Menschen und seinen individuellen Mobilitätsbedarf in den Vordergrund, so ist die Adaption neuer Lösungen denkbar.

Die verringerte Zahl von Fahrzeugen insgesamt kann einen erheblichen Einfluss auf die Automobilindustrie und damit insgesamt auf den Wirtschaftsstandort Deutschland haben. Das darf aber nicht verhindern, in diese Richtung vorzudenken oder die Entwicklung zu verzögern. Der Heizer auf der Elektrolokomotive hatte auch keine Zukunft.

Das autonome Fahren im Schwerlastverkehr kann ebenfalls eine grundlegende Änderung bewirken. Die begrenzten Lenkzeiten von Lkw-Fahrern und die damit verbundenen Ruhezeiten führen zu einer nicht optimalen Nutzung des Fuhrparks sowie regulatorisch bedingten Verzögerungen in der Logistik.

Autonom fahrende Lkw könnten rund um die Uhr eingesetzt werden. Damit würde die Transportkapazität erhöht, die Anzahl der benötigten Fahrzeuge verkleinert und die Transportzeiten verkürzt.

Im Sinne einer zunehmenden Dezentralität und Energieeinsparung sollte jedoch auch im Güterverkehr der Schwerpunkt auf die lokale Nutzung von bedarfsnah hergestellten Produkten gelegt werden.

Ein abschließender Aspekt des autonomen Fahrens ist die Sicherheit. Durch den Ausschluss menschlicher Fehler des Fahrers kann man davon ausgehen, dass Unfälle und damit verbundene Schäden von Menschen und Material verhindert oder zumindest verringert werden.

### Verkehrswende

Die Verkehrswende ist elektrisch und findet hoch automatisiert statt.

Alle bekannten Modalitäten sei es Individual- und Lastverkehr sowie ÖPNV und Fernverkehr werden zukünftig elektrisch angetrieben oder zumindest klimaneutral erzeugten Treibstoff benutzen. Damit verbunden sind ein insgesamt niedrigerer Primärenergiebedarf und eine geringere CO<sub>2</sub>-Belastung.

IT-Unterstützung beim autonomen Fahren und bei der individuellen Mobilität werden neue Geschäftsmodelle generieren und können auf existierende Geschäfte disruptive Auswirkungen haben.

### 2.3.6 Wärmewende

Die Bereitstellung von Wärme stellt heute über die Hälfte des Primärenergieverbrauchs dar. Der größte Teil, etwa 27 % entfällt auf die Raumwärme, gefolgt von 22 % für Prozesswärme. Die Erwärmung von Trinkwasser benötigt etwa 5 %. Weniger als 3 % werden derzeit für die Bereitstellung von Klima- und Prozesskälte benötigt.

Insgesamt ist damit zu rechnen, dass der Anteil der Wärmebereitstellung abnehmen, der der Kältebereitstellung in den kommenden Jahrzehnten zunehmen wird. In Summe wird durch den höheren Anteil von elektrischer Energie der Primärenergieverbrauch sinken. Wie das erfolgen kann, soll im Folgenden näher aufgezeigt werden.

Die erwartete Reduzierung der Heizwärme hat zwei Hauptgründe. Die durchschnittliche Nutzungsdauer von privaten und kommerziell genutzten Gebäuden beträgt in Deutschland etwa 80 Jahre. Innerhalb dieser Zeit werden sie entweder grundsaniert oder durch Neubauten ersetzt.

Bei einer Grundsanierung wird im Wesentlichen die Dämmung des Hauses ertüchtigt und damit der Wärmeverbrauch gesenkt. Auch der Austausch der Fenster trägt seinen Teil dazu bei. Wichtig ist hierbei auch die Materialwahl der Dämmung zur Vermeidung von Sondermüll beim Gebäudeabriss.

Durch den Einsatz von Wärmepumpen mit Niedertemperaturheizsystemen wie einer Fußbodenheizung sowie modernen Baumaterialien und Komponenten, z. B. Wärmerückgewinnungssysteme bei der Wohnraumlüftung, wird der Energiebedarf bei Neubauten zusätzlich erheblich gesenkt. Die KfW-Effizienzklasse gibt jeweils an, wie viel Energie gegenüber einem normalen Neubau verbraucht wird. Zurzeit ist KfW 40 plus die höchste Stufe, die auch den Einsatz lokal erzeugter erneuerbarer Energie vorsieht und den Gesamtverbrauch auf 40 % gegenüber einem Referenzgebäude, das den Vorgaben des Gebäudeenergiegesetzes (GEG) entspricht, reduziert. Weitere Verbesserungen sind hier zu erwarten.



Abbildung 32: Wärmepumpe (Quelle: Viessmann)

Aber auch bei der Ertüchtigung bestehender Gebäude können Wärmepumpen einen wesentlichen Beitrag leisten. Sogenannte Hochtemperatur-Wärmepumpen, die mit ähnlicher Technik auch im Industriebereich eingesetzt werden, können als Ersatz von Ölheizungen bei fehlender Gasinfrastruktur z. B. in ländlichen Gebieten zum Einsatz kommen. Sie erzeugen höhere Temperaturen, wie sie bei Konvektionsheizungen benötigt werden und erlauben bei Modernisierungen die Weiternutzung der Infrastruktur im Haus.

Bedingt durch den Klimawandel wird der Bedarf von Klimaanlage in Wohngebäuden zunehmen. Hier können sogenannte reversible Wärmepumpen zum Einsatz kommen, die sowohl Wärme als auch Kälte erzeugen. Dabei sorgen Gebläsekonvektoren für den notwendigen Luftaustausch.

Zum elektrischen Heizen sowie für Prozesswärme können auch Widerstands- oder Infrarot-Direktheizungen eingesetzt werden. Sie haben einen hohen Wirkungsgrad und lassen sich einfach ohne hohen Installationsaufwand integrieren.

Nachhaltige und umweltschonende Warmwasserversorgung kann entweder durch Solarthermie, also durch direktes Erwärmen mit Sonnenkollektoren oder mittels elektrischer Energie, erzeugt durch auf dem Dach angebrachte PV-Module erfolgen. Der Vorteil der letztgenannten Methode ist der geringere Installationsaufwand sowie die universelle Verwendung des Solarstroms über die Warmwasserbereitung hinaus.

In der energieintensiven Industrie, z. B. bei der Stahlherstellung oder bei der Zementproduktion können fossile Brennstoffe durch Wasserstoff, erzeugt durch Elektrolyse mit erneuerbarer Energie, ersetzt werden. Erste Pilotanlagen sind hier bereits im Einsatz. Weitere werden folgen, insbesondere auch nach einer Überarbeitung bzw. Anpassung der Prozesse selbst.

Abschließend ist festzuhalten, dass der Wärme- und Kältebedarf bedingt durch die thermische Trägheit einen erheblichen Anteil an flexiblen d. h. zeitlich verschiebbaren Lasten bereitstellt. Weitere Einzelheiten hierzu im Abschnitt Laststeuerung.

#### **Wärmewende**

Mehr als 50 % der Primärenergie Deutschlands wird heute durch Wärme- und Kälteerzeugung verbraucht. Eine Reduktion dieses Anteils stellt eine wesentliche Maßnahme im Rahmen der Energiewende dar.

Modernisierung und Neubauten von Gebäuden mit Einsatz von neuen Materialien, z. B. zur Dämmung, sowie Wärmepumpen übernehmen dabei eine Schlüsselrolle.

Im Bereich der energieintensiven Industrie können fossile Brennstoffe durch grünen Wasserstoff ersetzt werden.

Bedingt durch den Klimawandel wird der Energieverbrauch durch Bereitstellung von Klimakälte insbesondere im privaten Bereich zunehmen.

## 3 Wirtschaft und Politik

### 3.1 Marktstruktur und –teilnehmende

Eine Kombination von zentralen und lokalen Elementen, sowie eher dezentrale Strukturen mit Energiezellen unterschiedlicher Größe werden das zukünftige Energiesystem prägen. Bedingt durch die notwendige Sektorenkopplung entstehen neue bzw. durch Zusammenarbeit geänderte Aufgaben und Arbeitsgebiete.

Damit einhergehend ist, dass sich die Anzahl und Diversität von Marktteilnehmern stark vergrößern wird. Zusätzlich werden sowohl technische als auch wirtschaftliche Aufgaben vermehrt auf lokaler und regionaler Ebene adressiert und gelöst werden müssen.

Neue Marktteilnehmer wie Energiekommunen und Genossenschaften werden Spieler in diesen Märkten. Inwieweit diese Märkte entstehen, wird die Politik durch geänderte Rahmenbedingungen festlegen.

Die Rolle der Verbraucher hat sich bereits in den letzten Jahren verändert. Ihre weitgehend passive Rolle und Wahrnehmung des Energiesystems mittels Steckdose bzw. Tanksäule auf der einen Seite und mittels Geldbeutel und Bankkonto andererseits, hat sich in die eines aktiven **Prosumers** verwandelt. Und durch mehr Lokalität kann und wird sich das weiter verstärken. Diese Aussage trifft sowohl auf Privatpersonen als auch auf Betriebe und Industrien zu.

Bei Privatpersonen ist zusätzlich zu beachten, dass das zukünftige Energiesystem und die dazugehörigen Marktmechanismen den Trend zu mehr Selbstbestimmung und -verwirklichung im Sinne Bürger 2.0 verstärken können. Neue Aufgaben und Verantwortlichkeiten können aber auch von neuen Spielern im Markt übernommen werden.

#### Marktstruktur und Marktteilnehmende

Energiemärkte und Marktteilnehmer werden im zukünftigen, dezentral geprägten Energiesystem mehr lokale und/oder regionale Aspekte adressieren müssen.

Ihre Anzahl wird steigen und Raum für neue Aufgaben und Geschäftsmodelle schaffen. Der aktive Verbraucher wird mehr und mehr gefragt sein.

### 3.2 Energietarife und Geschäftsmodelle

Bedingt durch den Übergang zu erneuerbaren Energieträgern ändert sich die Zusammensetzung der Energiegestehungskosten. Da uns die Sonne keine Rechnung schickt, entfallen in Zukunft mehr und mehr die Brennstoffkosten. Diese machen heute im Durchschnitt etwa 30% der Herstellkosten aus. Zusätzlich ist zu berücksichtigen, dass CO<sub>2</sub>-Zertifikate mit wachsendem Anteil erneuerbarer Energieerzeugung zunehmend keine Rolle mehr spielen werden.

Die verbleibenden Anteile der Herstellkosten müssen damit letztendlich nur die Investitionskosten in die Infrastruktur im Sinne kalkulatorischer Zinsen und Abschreibungen decken sowie die Kosten für den Betrieb und die Wartung. Energieabhängige Anteile werden damit weitgehend entfallen. Mit anderen Worten heißt das: **Energy-only-Tarife** haben wohl keine Zukunft.

Nimmt man Anleihe bei der Tarifentwicklung im Bereich der Telekommunikation, werden damit **Flat-rates** auch bei Energie für die Endverbraucher prinzipiell möglich, wenn auch kritisch zu prüfen, um nicht zur Verschwendung von Energie zu führen. Entsprechend der Bandbreitenbegrenzung beim Mobilfunk kann das im Energiebereich mit einer temporären Leistungsbegrenzung einhergehen. Unabhängig von zukünftigen Tarifstrukturen muss sichergestellt sein, dass die oftmals dynamische Preisfindung transparent ist und aufkommensorientiert an den Kunden weitergegeben wird.

Trotz möglicher Flatrates und bedingt durch die Leistungsbegrenzung werden Verbraucher angehalten, Maßnahmen zur Reduzierung ihres Energiebedarfs zu ergreifen. Im privaten Bereich geht das einher mit der Anschaffung von Geräten mit den besten Energieeffizienzklassen. Im kommerziellen

Bereich ist das branchenabhängig und kann u. a. durch Nutzung von Abwärme und Überarbeitung von Herstellungsprozessen erreicht werden.

Wie bereits im vorangegangenen Abschnitt beschrieben, schafft die mehr dezentrale Grundstruktur des Energiesystems neue Marktteilnehmer aber auch neue Geschäftsmodelle. Der heute existierende Trend zum Leasing oder gemeinsamen Teilen von Gebrauchsgegenständen wird sich fortsetzen.

Das trifft nicht nur auf den Bereich der Mobilität zu, wo Car-Sharing-Angebote weiter zunehmen werden. Ein neues Modell in diesem Zusammenhang ist das Auto-Abonnement. Es bietet die Möglichkeit verschiedene Typen nur für eine bestimmte Zeit zu fahren und sich damit den Anforderungen der Verbraucher anzupassen. Entsprechende Angebote gibt es bereits sowohl seitens einzelner Hersteller als auch von Mietwagenfirmen.

Auch im Bereich der Energieversorgung gibt es neue Möglichkeiten. So kann man sich vorstellen, dass PV-Anlagen von Anbietern an Hausbesitzer oder Unternehmen verliehen werden, einen Full-Service-Vertrag eingeschlossen. Alternativ können Hausbesitzer ihre Dachflächen an Betreiber von PV-Anlagen verpachten und erhalten dafür ein gewisses Stromkontingent. Auch für Energiespeicher existieren bereits ähnliche Geschäftsmodelle, wobei der Endkunde nur von der Funktion eines fiktiven Speichers profitiert, ohne diesen besitzen oder aufstellen zu müssen. Bei Festlegung von weiteren Details wie der Beteiligung von Personen und Gesellschaften an solchen Anbietern gibt es viele, heute noch nicht praktizierte Möglichkeiten.

Durch den zellularen Ansatz auf Gemeinde- oder Quartiersebene können Energiekommunen oder Genossenschaften gegründet und damit die Bürger auch aktiv in ihr Versorgungssystem eingebunden werden. Vorteile dieses Ansatzes könnten eine höhere Akzeptanz der Verbraucher sein.

#### **Energietarife und Geschäftsmodelle**

Das zukünftige Energiesystem wird sich maßgeblich vom heutigen unterscheiden. Erneuerbare Energiequellen bedingen geänderte Gestehungskosten und bieten die Möglichkeit anderer Tarifstrukturen.

Dezentrale Strukturen können zu neuen Geschäftsmodellen führen. Der Trend „Teilen ist das neue Haben“ wird sich verstärken.

### **3.3 Regulative Rahmenbedingungen**

Eine Vielzahl von Gesetzen, Verordnungen und Regelungen definieren entscheidend das heutige Energiesystem. Sie sind durch die Vergangenheit oft geprägt von spezifischen Anforderungen eines Sektors und unterstützen nur bedingt den Gedanken des Co-Designs im Sinne der Sektorenkopplung sowie neue bzw. notwendige Technologien. Manchmal sind sie sogar zueinander widersprüchlich.

Es wird darauf verzichtet in diesem Zusammenhang auf weitere Details einzugehen, da dies den Umfang des Dokuments sprengen würde.

Zwei Beispiele, respektive Vorschläge, sollen trotzdem nicht unerwähnt bleiben. Wenn man eine autarke Versorgung der Bundesrepublik Deutschland mit erneuerbarer Energie anstrebt – und diese im Wesentlichen auf der Basis von Windenergie und Photovoltaik – sollten zwei Regelungen zeitnah diskutiert und umgesetzt werden können. Für die Ertüchtigung von Windenergieanlagen aber auch bei Neubauten muss eine flexible Lösung bezüglich der Abstandsregelung bundesweit gefunden und eingeführt werden. Hier sollte u. a. ein Mitspracherecht der lokalen Bevölkerung berücksichtigt werden.

Das zweite Beispiel betrifft die Photovoltaik. Auch wenn das Baurecht landes- und gemeindespezifisch ist, könnte eine bundesweite Regelung erreichen, dass ab sofort für Neubauten die Pflicht zur Installation von PV-Anlagen eingeführt wird. Eine entsprechende Regelung für Dachsanierungen sollte ergänzt werden. Diese könnten entweder staatlich gefördert werden, u. a. auch durch den lokalen Versorger oder neue Unternehmen mit innovativen Geschäftsmodellen. Beide Vorschläge können erhebliche Potenziale heben und die Selbstversorgung Deutschlands mit erneuerbaren Energien voranbringen.

Für das weitere Vorgehen wird vorgeschlagen, dass zunächst von allen beteiligten Sektoren und Branchen ein gemeinsames Bild des zukünftigen Energiesystems erstellt wird, das nicht nur von einzelnen Partikularinteressen geprägt wird. Dieses wird ein lebendes Dokument sein, das kontinuierlich angepasst werden wird. Dies sicherzustellen ist die Aufgabe der Politik. Zeitlich versetzt kann dann diskutiert und beschlossen werden, wie geeignete Rahmenbedingungen und Gesetze in Zukunft aussehen müssen.

### **Regulative Rahmenbedingungen**

Die anstehende Überarbeitung bestehender Rahmenbedingungen und Regelungen muss europaweit folgendem Grundsatz folgen:

Nicht die bestehenden Rahmenbedingungen und Regeln formen das zukünftige Energiesystem, sondern sind unter Aspekten der Nachhaltigkeit den technischen Vorgaben anzupassen.

Praktisch bedeutet das, dass zunächst das zukünftige Energiesystem definiert sein muss, bevor die Regeln und Rahmenbedingungen für die Zielerreichung festgelegt werden.



## 4 Digitalisierung und Datenschutz

### 4.1 Automatisierung und Technologien

Der zellulare Ansatz mit Energiezellen, der dem Grundprinzip der lokalen Balancierung von Erzeugung und Verbrauch folgt, bedingt einen hohen Grad von Automatisierung. Dies trifft sowohl für den technischen Teil als auch für den kommerziellen Teil zu.

Es ist davon auszugehen, dass dabei die meisten Abläufe transparent und automatisch vorher festgelegten Regeln und Vereinbarungen folgen. Manuelle Eingriffe sind auf ein Minimum zu begrenzen und sollten nur bei unvorhergesehenen Situationen zum Einsatz kommen.

Die Systemführung wird in festgelegten Zyklen oder auch dynamisch flexibel die Balancierung der Erzeugung und des Verbrauchs managen. Mögliche Zykluszeiten müssen noch weiter erforscht werden, werden aber wahrscheinlich im einstelligen Minutenbereich liegen. Die jeweils aktuell zum Einsatz kommende Zykluszeit muss allen Teilnehmern der Energiezelle bekannt sein, so dass unterlagerte Zellen zeitgerecht zum Systemmanagement die notwendigen Informationen liefern können.

Zurzeit gibt es Überlegungen, dass im heutigen Bereich von Ortsnetzstationen in Zukunft Gleichstrom den Dreh- bzw. Wechselstrom ersetzen könnte. Dies hätte Auswirkungen u. a. auf die Systemführung und Netzdienstleistungen sowie den Selektivschutz und damit auf die Automatisierung. Hierzu sind aber weitere Untersuchungen notwendig.

Im Hinblick auf die notwendigen Kommunikationsverbindungen innerhalb der Energiezelle kann man existierende Einrichtungen der Telekommunikation nutzen. Insbesondere die bei fast jedem Verbraucher vorhandenen Router zum Anschluss an das Internet kommen dafür in Frage. Dazu wären Vereinbarungen mit den Herstellern der Router notwendig mit dem Ziel, diese als Plattform zu öffnen. Über vertrauenswürdige Softwarekomponenten könnten dann die notwendigen Funktionen realisiert werden. Die Verbindung zu weiteren Einrichtungen kann dann drahtlos über WLAN erfolgen.

Falls eine dynamische Preisbildung zum Einsatz kommt, müssen ihre Algorithmen sowie die maximale Anzahl von Verhandlungsrunden allen Teilnehmern bekannt sein. Falls kein Ergebnis erzielt werden kann, stellt der Systemführer zwangsweise die Balance zwischen Erzeugung und Verbrauch her. Dabei kann er z. B. die maximal beziehbare Leistung einzelner Teilnehmer remote limitieren. Dazu ist es notwendig, dass alle Verbraucher mittels Leistungselektronik als Stellglied an die Energiezelle angebunden sind.

Wartungsarbeiten werden überwiegend online durchgeführt. Es ist anzustreben, dass der physische Tausch von Komponenten eventuell auch von Verbrauchern selbst durchgeführt werden kann.

#### Automatisierung und Technologien

Der zellulare Ansatz mit hoher Dezentralität bedingt kleinteiligere Strukturen. Dies verlangt in Kombination mit der volatilen Erzeugungscharakteristik von erneuerbaren Energien einen hohen Grad der Automatisierung.

Da zur Systemführung und -stabilität sehr schnelle Entscheidungen notwendig sind, müssen die meisten Maßnahmen nach vorher festgelegten und transparenten Regeln automatisch ablaufen.

Für die notwendigen Kommunikationsverbindungen zwischen den dezentral angeordneten Komponenten können vorhandene Infrastrukturen wie das Internet und private Router genutzt werden

### 4.2 Datenschutz

Ein wesentlicher Vorteil des zellularen Ansatzes, Erzeugung und Verbrauch, wenn möglich, lokal zu balancieren, liegt darin, dass der Austausch von Daten innerhalb der Zelle und zu Nachbarzellen auf ein Minimum beschränkt werden kann. Es muss erreicht werden, dass die gesamte Systemführung mit anonymisierten Daten durchgeführt wird. Wenn dies nicht möglich ist, müssen Verfahren wie z. B. die asymmetrische Verschlüsselung zum Einsatz kommen. Die Anonymisierung von Daten könnte eine hoheitliche Aufgabe werden.

Generell ist zu überprüfen, inwieweit heutige Regeln des Datenschutzes reformiert werden müssen. Es geht dabei nicht um eine generelle Aufweichung, sondern um eine kritische Betrachtung des Datenschutzes in Zeiten von sozialen Netzwerken und anderen Onlinediensten. Es muss auf jeden Fall verhindert werden, dass Daten aus dem Energienetz zur Handelsware und fremdbestimmt genutzt werden.

Die im vorangegangenen Abschnitt beschriebene höhere Automatisierung in einem über Kommunikationskanäle verbundenen dezentralen System erhöht prinzipiell die Vulnerabilität. Allerdings reduziert die hohe Anzahl von möglichen Zielen, d. h. von Zellen, die Attraktivität für die Angreifer. Trotzdem sind eine Vielzahl und eine Diversität von Maßnahmen anzustreben.

#### **Datenschutz**

Der zellulare Ansatz bietet bezüglich des notwendigen Datenaustauschs und damit für den Datenschutz Vorteile. Auf der anderen Seite erhöht die Anzahl von verteilten, über Kommunikationskanäle verbundenen Einrichtungen grundsätzlich die Vulnerabilität.

Deshalb muss der Datenschutz bereits bei der Entwicklung von Hard- und Software als wichtigste nicht-funktionsrelevante Funktion berücksichtigt werden.

## D Handlungsempfehlungen

Aus den untersuchten Dokumenten im Rahmen der Bestandsaufnahme für Teil 1 sowie den Ergebnissen und Vorschlägen zur Vision Energiesystem 2050, dokumentiert in Teil 2, ergeben sich die folgenden Handlungsempfehlungen ergänzt um allgemeine Aspekte in den Bereichen Bildung, Innovation und persönlichem Engagement:

- Die Untersuchungen und Vorschläge zum zukünftigen Energiesystem haben nochmals die **Komplexität des Vorhabens** aufgezeigt. Zur Koordination und Bewältigung der vielfältigen Aufgaben wird vorgeschlagen, eine **befugte und befähigte Institution** zu etablieren, die einen **systemischen Ansatz** u. a. für Energie, d. h. Strom und Wärme/Kälte, Verkehr und Bauwesen verfolgt.
- Der zellulare Ansatz, lokal, regional und deutschlandweit angewandt, gewährleistet eine erfolgreiche Energiewende und sollte als **Basis für weitere Entwicklungsschritte jetzt verbindlich angewendet werden**, um die Sektorenkopplung, die Laststeuerung sowie nachhaltige Geschäftsmodelle zu unterstützen.
- Der zellulare Ansatz ermöglicht eine hohe Resilienz bei hoher Automatisierung. Es ist verbindlich festzulegen und zu überprüfen, den **Datenaustausch auf das Notwendige zu reduzieren**.
- **Erneuerbarer Strom und erneuerbares Gas**, wie z. B. grüner Wasserstoff werden **gemeinsam** die Grundlage für unser Energiesystem bilden. Für diese zukünftige Energiewelt sind sowohl die **Transport- als auch die Verteilungsinfrastruktur** beider Energiemedien essenziell und werden eng miteinander gekoppelt sein. Bei **zeitlich ausgeglichener Erzeugung und Verbrauch** wird überwiegend das **Stromnetz** genutzt. **Gase** dienen vorrangig der **Speicherung von Energie für den Ausgleich von länger andauernden Ungleichgewichten** und für die erzeugungsferne Versorgung.
- Nicht die heutigen **Rahmenbedingungen und Regeln** formen die zukünftigen Lösungen, sondern müssen unter **Aspekten der Nachhaltigkeit den technischen Vorgaben und Notwendigkeiten folgen**.
- **Diskussionen über die Energiewende** mit regulatorischem Inhalt sind dahingehend zu führen, mit hoher Priorität **Vorschläge für das zukünftigen Rahmenwerk** zu machen und nicht die Umgehung bestehender Regelungen zu definieren.
- Zur Sicherstellung einer zuverlässigen Energieversorgung verlangt die **volatile Erzeugungseigenschaft** von erneuerbaren Ressourcen neben der **Flexibilisierung des Verbrauchs** den Einsatz von **Energiespeichern** für unterschiedliche Zeitbereiche und Anwendungen als auch steuerbar einsetzbare Erzeugungseinheiten. Hierfür ist ein gesondertes **Schwerpunktprogramm** zur Entwicklung von Technologien und Applikationen zu etablieren.
- Die deutsche **Wasserstoffstrategie** ist **kurzfristig** um den Einsatz von Wasserstoff als Grundlage für die (saisonale) **Speicherung von Energie** zu ergänzen.
- Als **Führungsgröße und Entscheidungshilfe** für die Energiewende sowie zur **Fortschrittskontrolle** sind die **Treibhausgasemissionen** einzusetzen und monetär über den jeweils aktuellen Zertifikatspreis zu bewerten.
- Für die künftigen Herausforderungen des Energiesystems sind mit Priorität Anpassungen bzw. Ergänzungen in der **schulischen, gewerblichen und universitären Ausbildung** notwendig. Dies gilt insbesondere für **gesamtheitliches Denken und Handeln** sowie für sämtliche **systemischen Aspekte**. Dabei sollte die Behebung des Fachpersonalmangels höchste Priorität genießen.
- Die **Zukunftssicherung** und die dringend benötigte **Beschleunigung** der Energiewende verlangen jetzt die Innovationskraft und -geschwindigkeit der deutschen **Industrie** – einschließlich des **Mittelstands** – gezielt zu verbessern und zu fördern. Damit wird maßgeblich dazu beigetragen, dass im Inland erprobte Lösungen **weltweit vermarktet** und eingesetzt werden können.
- Für eine **erfolgreiche Energiewende** ist die gesellschaftliche Akzeptanz und somit **ein Beitrag** aller Bürgerinnen und Bürgern **unabdingbar**.

# Glossar

## Aggregator

bündelt Erzeugung, Vermarktung und Verbrauch von Strom, Gas oder Wärme mehrerer Vertragspartner mit dem Ziel der wirtschaftlichen und energetischen Optimierung.

## Demand Side Integration (DSI)

wird als übergeordneter bzw. integrierender Begriff für Demand Side Management und Demand Side Response benutzt.

## Demand Side Management (DSM)

umfasst die direkte Beeinflussung des Energieverbrauchs. Dabei kann der Energieverbrauch zu einem bestimmten Zeitpunkt erhöht oder reduziert werden. Gründe für die Verbrauchsbeeinflussung können technischer, kommerzieller und / oder ökologischer Natur sein.

## Demand Side Response

umfasst die Reaktion des Verbrauchers auf ein Anreizsignal, welches meist monetärer Art ist, sprich ein zeitabhängiger Tarif z. B. mit Hoch-, Mittel- und Niedrigtarifzeiten [89]

## eHighway

bezeichnet eine von Siemens entwickelte Lösung für den elektrischen Schwerlastverkehr. Mittels Oberleitung und auf den Fahrzeugen angebrachter Stromabnehmer werden elektrisch angetriebene Lastkraftwagen entweder direkt versorgt und/oder die im Fahrzeug befindlichen Batterien aufgeladen. Zurzeit (2021) gibt es in Deutschland zwei Teststrecken.

## Energiezelle (Definition der ETG)

Eine **Energiezelle** besteht aus der Netzinfrastruktur<sup>1)</sup> verschiedener Energieformen<sup>2)</sup>, in der durch ein Energiezellenmanagement<sup>3)</sup> in möglicher Koordination mit Nachbarzellen<sup>4)</sup> der Ausgleich<sup>5)</sup> von Erzeugung und Verbrauch über alle vorhandenen Energieformen organisiert wird.

- 1) Zur **Netzinfrastruktur** werden alle Betriebsmittel gezählt, die zur Wandlung von Energie, zu deren Transport und Verteilung, sowie zur Speicherung eingesetzt werden.
- 2) Betrachtete **Energieformen** umfassen u. a. Elektrizität, Gas und Wärme sowie die Mobilität als energieintensive Anwendung.
- 3) Zum **Energiezellenmanagement** zählen alle Einrichtungen der Leittechnik einschließlich der benötigten Kommunikationstechnik und Aktorik.
- 4) **Nachbarzellen** können hierarchisch angeordnet sein. Es gibt somit Zellen auf der gleichen Ebene sowie auf überlagerten und unterlagerten Ebenen.
- 5) Beim **Ausgleich**, der sowohl saisonal oder auch dynamisch durchgeführt werden kann, können sich die drei Zustände ausgeglichen, übertersorgt oder unterversorgt über alle vorhandenen Energieformen ergeben.

## Energiespeicherprinzipien

es wird zwischen elektrischen, thermischen, chemischen bzw. elektro-chemischen und mechanischen Energiespeichern unterschieden. Die im folgenden aufgezählten Beispiele sind nicht vollständig und dienen nur der Verdeutlichung.

- **elektrische Speicher:** Kondensatoren, Supraleitende Magnetische Energiespeicher (SMES)
- **thermische Speicher:** Wasser, Stein bzw. Fels
- **chemische Speicher:** Speicherung von chemischen Produkten gasförmig, bzw. in flüssiger oder fester Form
- **elektro-chemische Speicher:** Batterien, z. B. Blei-Säure-, Lithium-Ionen- oder Redox-Flow-Batterien
- **mechanische Speicher:** Pumpspeicher, Druckluft, Schwungräder

### **Energy-only-Tarife**

stellen eine Tarifform dar, in der im Wesentlichen oder ausschließlich die bezogene Energie berücksichtigt wird. Der Leistungspreisanteil für die Nutzung der Infrastruktur entfällt dabei.

### **Erdwärme**

oder auch Geothermie, ist die in der Erdkruste zugängliche Wärme. Sie zählt zu den regenerativen Energien und hat eine weitgehend konstante Verfügbarkeit. Je nach Tiefe unterscheidet man zwischen oberflächennaher Wärme d. h. kleiner 100 Meter Tiefe und Tiefengeothermie d. h. in Deutschland bis zu 5.000 Meter.

### **(trockene) Dunkelflaute**

bezeichnet in der Energiewirtschaft eine Zeitspanne, in der aufgrund von geringem Windaufkommen, fehlender Sonneneinstrahlung und Niedrigwasser sehr wenig erneuerbare Energie aus diesen Quellen zur Verfügung steht.

### **Flatrate**

bezeichnet einen Tarif, bei dem nicht nach Verbrauch abgerechnet wird. Über einen Festbetrag wird ein definierter Service zur Verfügung gestellt. Eine Nutzung über den normalen oder vereinbarten Rahmen hinaus, kann zu Leistungseinschränkungen führen. Die heute bekannteste Form der Flatrate findet Anwendung in der Telekommunikation.

### **Prosumer**

ist ein Kunstwort aus Producer (in Deutsch Erzeuger) und Consumer (in Deutsch Verbraucher). Es bezeichnet einen Teilnehmer im Energienetz, der sowohl Energie bezieht als auch Energie selbst erzeugt.

### **Repowering**

Alle technischen Anlagen haben eine definierte Lebensdauer. Repowering bezeichnet die Ertüchtigung einer Anlage mit Austausch der verschlissenen Teile. Dabei wird in der Regel ein höherer Wirkungsgrad bei meist auch höherer Leistung erzielt. Bei Windenergie-Anlagen fällt unter den Begriff in den meisten Fällen der Rückbau von Altanlagen und eine ortsnahe Erbauung von Neuanlagen.

### **Schwarzstart**

bezeichnet die Fähigkeit einer Erzeugungsanlage bei einem Blackout aus eigener Kraft und ohne extern zugeführte Energie den Betrieb wieder aufzunehmen.

### **Urbane Standseilbahn**

bezeichnet eine Punkt-zu-Punkt-Verbindung, die im städtischen Bereich dem Personentransport dient. Sie folgt dabei oft den Straßenzügen, kann aber auch zur Überwindung von Höhenunterschieden eingesetzt werden.

### **Verbrauchsorientierte Erzeugung**

ist das heute vorherrschende Prinzip bei der elektrischen Energieversorgung. Regelbare Kraftwerke stellen je nach Bedarf die von den Verbrauchern geforderte Energie zur Verfügung.

### **Erzeugungsorientierter Verbrauch**

ist ein probates Mittel, die volatile Erzeugungseigenschaft von erneuerbaren Energieressourcen zu nutzen. Je nach aktuell verfügbarer Leistung werden unterbrechbare Verbraucher entweder ferngesteuert ein- und ausgeschaltet oder reagieren auf Preissignale des Anbieters.

### **Virtuelles Kraftwerk**

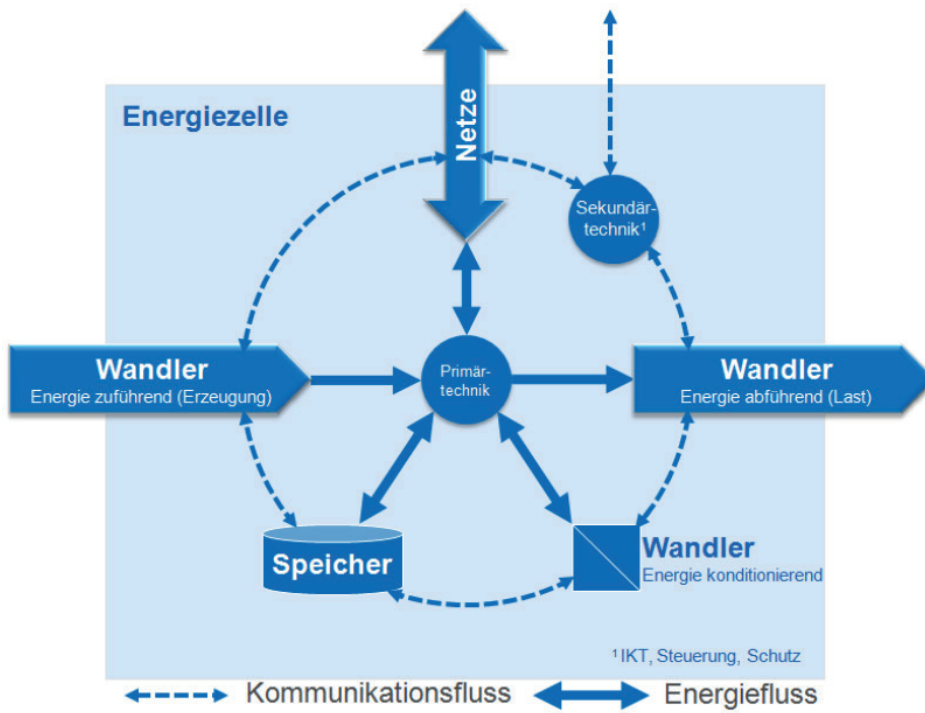
ist ein Zusammenschluss von dezentralen Erzeugern und/oder Verbrauchern, einschl. Speichern, die über ein gemeinsames Leitsystem koordiniert werden. Das Geschäftsmodell des virtuellen Kraftwerks ist die Vermarktung von Energie und Flexibilität der angeschlossenen Anlagen.

### **Windenergieanlagen Onshore und Offshore**

Onshore-Windenergieanlagen erzeugen elektrische Energie an Land, Offshore-Anlagen auf dem Meer. Letztgenannte sind oft größer aber auch aufgrund der erschwerten Installation und Betrieb teurer. Dies wird durch das kontinuierlichere Dargebot von Wind und damit verbunden höherer Volllaststunden kompensiert.

**Zellularer Ansatz** (s. a. „Energiezelle“)

basiert auf der Bildung von Energiezellen in einem räumlich abgegrenzten definierten Gebiet unter Einbeziehung aller Arten von Energie. Ziel ist es, die Erzeugung und den Verbrauch von Energie zu jeder Zeit so weit wie technisch möglich und wirtschaftlich sinnvoll auszubalancieren.



Quelle: [87]

# Literaturverzeichnis

- [1] Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi), „Die Energie der Zukunft: Sechster Monitoring-Bericht zur Energiewende“. Berichtsjahr 2016, Berlin, Juni 2018. [Online]. Verfügbar unter: [https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Publikationen/Energie/sechster-monitoring-bericht-zur-energiewende.pdf?\\_\\_blob=publicationFile&v=39](https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Publikationen/Energie/sechster-monitoring-bericht-zur-energiewende.pdf?__blob=publicationFile&v=39). Zugriff am: 12. November 2021.
- [2] A. Grunwald, „Warum die Energiewende so schwer ist. Ethische Fragen und Akzeptanzprobleme“, *Denkströme. Journal der Sächsischen Akademie der Wissenschaften*, Nr. 19, S. 94–102, 2018. [Online]. Verfügbar unter: [http://repo.saw-leipzig.de/pubman/item/escidoc:49077/component/escidoc:49075/denkstroeme-heft19\\_94-102\\_grunwald.pdf](http://repo.saw-leipzig.de/pubman/item/escidoc:49077/component/escidoc:49075/denkstroeme-heft19_94-102_grunwald.pdf)
- [3] M. R. Marco Sonnberger, „Die gesellschaftliche Wahrnehmung der Energiewende: Ergebnisse einer deutschlandweiten Repräsentativbefragung.“, 2016.
- [4] Umweltbundesamt, *Netzausbau*. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.umweltbundesamt.de/themen/klima-energie/energieversorgung/netzausbau#Netzausbau> (Zugriff am: 5. August 2022).
- [5] Bundesnetzagentur für Elektrizität, Gas, Telekommunikation, Post und Eisenbahn, „Bestätigung des Netzentwicklungsplans Strom für das Zieljahr 2035“. Bedarfsermittlung 2021-2035, Jan. 2022. [Online]. Verfügbar unter: [https://www.netzentwicklungsplan.de/sites/default/files/paragraphs-files/NEP2035\\_Bestaetigung.pdf](https://www.netzentwicklungsplan.de/sites/default/files/paragraphs-files/NEP2035_Bestaetigung.pdf).
- [6] IRENA, „Virtual Power Lines: Innovation Landscape Brief“, Abu Dhabi, 2020. [Online]. Verfügbar unter: [https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2020/Jul/IRENA\\_Virtual\\_power\\_lines\\_2020.pdf?la=en&hash=C58043124D596D1CF75395066817C-38B55AC1983](https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2020/Jul/IRENA_Virtual_power_lines_2020.pdf?la=en&hash=C58043124D596D1CF75395066817C-38B55AC1983).
- [7] M. Robinius, F. Kullmann, P. Markewitz und P. Lopion, *Wege für die Energiewende: Kosteneffiziente und klimagerechte Transformationsstrategien für das deutsche Energiesystem bis zum Jahr 2050*. Jülich: Forschungszentrum Jülich GmbH Zentralbibliothek Verlag, 2020.
- [8] P. Gerbert *et al.*, *Klimapfade für Deutschland*, 2018.
- [9] Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi), „Strom 2030: Langfristige Trends - Aufgaben für die kommenden Jahre“. Impulspapier, Berlin, Sep. 2016. [Online]. Verfügbar unter: [https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Publikationen/Energie/impulspapier-strom-2030.pdf?\\_\\_blob=publicationFile&v=23](https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Publikationen/Energie/impulspapier-strom-2030.pdf?__blob=publicationFile&v=23). Zugriff am: 23. Dezember 2021.
- [10] Umweltbundesamt, Hg., „Kein Grund zur Lücke: So erreicht Deutschland seine Klimaschutzziele im Verkehrssektor für das Jahr 2030“. Position // November 2019, Dessau-Roßlau, Juni 2019. [Online]. Verfügbar unter: [https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/1410/publikationen/19-12-03\\_uba\\_pos\\_kein\\_grund\\_zur\\_luecke\\_bf\\_0.pdf](https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/1410/publikationen/19-12-03_uba_pos_kein_grund_zur_luecke_bf_0.pdf). Zugriff am: 12. November 2021.
- [11] Umweltbundesamt, *Fahrleistungen, Verkehrsleistungen und „Modal-Split“*. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.umweltbundesamt.de/daten/verkehr/fahrleistungen-verkehrsaufwand-modal-split#fahrleistung-im-personen-und-guterverkehr> (Zugriff am: 12. November 2021).
- [12] M. Robinius, „Die Verkehrswende erreichen: vermeiden, verlagern, verbessern“, *FVEE Themenhefte: Lösungsbeiträge zur Energiesystemtransformation - Verkehrswende*, S. 19–23, 2019.
- [13] Sachverständigenrat für Umweltfragen (SRU), „Für eine entschlossene Umweltpolitik in Deutschland und Europa: Umweltgutachten 2020“, Berlin, 2020. [Online]. Verfügbar unter: [https://www.umweltrat.de/SharedDocs/Downloads/DE/01\\_Umweltgutachten/2016\\_2020/2020\\_Umweltgutachten\\_Entschlossene\\_Umweltpolitik.pdf;jsessionid=5F6DD0FCBFD279F8BB267F3DC0EB2768.2\\_cid284?\\_\\_blob=publicationFile&v=31](https://www.umweltrat.de/SharedDocs/Downloads/DE/01_Umweltgutachten/2016_2020/2020_Umweltgutachten_Entschlossene_Umweltpolitik.pdf;jsessionid=5F6DD0FCBFD279F8BB267F3DC0EB2768.2_cid284?__blob=publicationFile&v=31). Zugriff am: 12. November 2021.
- [14] Zimmermann, Till *et al.*, „Die Ökologisierung des Onlinehandels: Neue Herausforderungen für die umweltpolitische Förderung eines nachhaltigen Konsums“. Teilbericht 1, Umweltbundesamt, Texte 227, Dez. 2020. [Online]. Verfügbar unter: [https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/5750/publikationen/2020\\_12\\_03\\_texte\\_227-2020\\_online-handel.pdf](https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/5750/publikationen/2020_12_03_texte_227-2020_online-handel.pdf). Zugriff am: 12. November 2021.
- [15] Kraftfahrtbundesamt, *Der Fahrzeugbestand am 1. Januar 2021*. [Online]. Verfügbar unter: [https://www.kba.de/DE/Presse/Pressemitteilungen/Fahrzeugbestand/2021/pm08\\_fz\\_bestand\\_pm\\_komplett.html](https://www.kba.de/DE/Presse/Pressemitteilungen/Fahrzeugbestand/2021/pm08_fz_bestand_pm_komplett.html) (Zugriff am: 12. November 2021).
- [16] Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur, „Mobilität in Deutschland - MiD: Grafiken zum Radverkehr und Fußverkehr“.
- [17] C. Nobis, „Mobilität in Deutschland - MiD: Analysen zum Radverkehr und Fußverkehr“, Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur, Bonn, 2019. [Online]. Verfügbar unter: [http://www.mobilitaet-in-deutschland.de/pdf/MiD2017\\_Analyse\\_zum\\_Rad\\_und\\_Fu%C3%9Fverkehr.pdf](http://www.mobilitaet-in-deutschland.de/pdf/MiD2017_Analyse_zum_Rad_und_Fu%C3%9Fverkehr.pdf). Zugriff am: 12. November 2021.

- [18] Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur, „Monilität in Deutschland - MiD: Ergebnisbericht“, Bonn, 2018. [Online]. Verfügbar unter: [https://www.bmvi.de/SharedDocs/DE/Anlage/G/mid-ergebnisbericht.pdf?\\_\\_blob=publicationFile](https://www.bmvi.de/SharedDocs/DE/Anlage/G/mid-ergebnisbericht.pdf?__blob=publicationFile). Zugriff am: 12. November 2021.
- [19] K. Möhring *et al.*, „Die Mannheimer Corona-Studie: Schwerpunktbericht zur Erwerbstätigkeit in Deutschland: 20.3. - 15.4.2020“, 16. Apr. 2020. [Online]. Verfügbar unter: [https://www.uni-mannheim.de/media/Einrichtungen/gip/Corona\\_Studie/2020-04-16\\_Schwerpunktbericht\\_Erwerbstaetigkeit.pdf](https://www.uni-mannheim.de/media/Einrichtungen/gip/Corona_Studie/2020-04-16_Schwerpunktbericht_Erwerbstaetigkeit.pdf). Zugriff am: 12. November 2021.
- [20] C. Köllner, <https://www.springerprofessional.de/carsharing/multimodale-mobilitaet/der-nutzen-von-carsharing-ist-weiterhin-umstritten/17102504>. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.springerprofessional.de/carsharing/multimodale-mobilitaet/der-nutzen-von-carsharing-ist-weiterhin-umstritten/17102504> (Zugriff am: 12. November 2021).
- [21] F. Hülsmann *et al.*, „share - Wissenschaftliche Begleitforschung zur car2go mit batterieelektrischen Fahrzeugen: Forschung zum free-floating Carsharing“. Abschlussbericht, Öko-Institut e.V.; ISOE - Institut für sozial-ökologische Forschung, Berlin, 6. Sep. 2018. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.oeko.de/fileadmin/oekodoc/share-Wissenschaftliche-Begleitforschung-zu-car2go-mit-batterieelektrischen-und-konventionellen-Fahrzeugen.pdf>. Zugriff am: 12. November 2021.
- [22] A.T.Kearny, „The Demystification of Car Sharing: An in-depth analysis of customer perspective, underlying economics, and secondary effects“, 2019. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.de.kenney.com/documents/1117166/0/Car+Sharing.pdf/3bff4a9a-1279-b26f-3b23-8183f14979ce?t=1567671915000>. Zugriff am: 12. November 2021.
- [23] VDI/VDE Innovation + Technik GmbH, „Jahresbericht 2016“, Berlin, 2016.
- [24] Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit, *HEAT: Hamburg Electric Autonomous Transportation*. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.erneuerbar-mobil.de/projekte/heat> (Zugriff am: 12. November 2021).
- [25] *Der europäische Grüne Deal: COM(2019) 640 final*, 2019. [Online]. Verfügbar unter: [https://eur-lex.europa.eu/resource.html?uri=cellar:b828d165-1c22-11ea-8c1f-01aa75ed71a1.0021.02/DOC\\_1&format=PDF](https://eur-lex.europa.eu/resource.html?uri=cellar:b828d165-1c22-11ea-8c1f-01aa75ed71a1.0021.02/DOC_1&format=PDF)
- [26] *Strategie für nachhaltige und intelligente Mobilität: Den Verkehr in Europa auf Zukunftskurs bringen: COM(2020) 789 final*, 2020. [Online]. Verfügbar unter: [https://eur-lex.europa.eu/resource.html?uri=cellar:5e601657-3b06-11eb-b27b-01aa75ed71a1.0003.02/DOC\\_1&format=PDF](https://eur-lex.europa.eu/resource.html?uri=cellar:5e601657-3b06-11eb-b27b-01aa75ed71a1.0003.02/DOC_1&format=PDF)
- [27] Europäisches Parlament, *Legislative Train Schedule: Fit for 55 package under the european green deal*. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.europarl.europa.eu/legislative-train/theme-a-european-green-deal/package-fit-for-55> (Zugriff am: 12. November 2021).
- [28] U. Maier, F. Peter und A. Jahn, „Verteilnetzausbau für die Energiewende - Elektromobilität im Fokus: Schlussfolgerungen zu einer Studie im Auftrag von Agora Verkehrswende, Agora Energiewende und The Regulatory Assistance Project (RAP)“, Agora Energiewende, Agora Verkehrswende, RAP, Aug. 2019. [Online]. Verfügbar unter: [https://static.agora-energiewende.de/fileadmin/Projekte/2018/Netzausbau\\_Elektromobilitaet/AgoraRAP2019\\_VerteilnetzausbauElektromobilitaet.pdf](https://static.agora-energiewende.de/fileadmin/Projekte/2018/Netzausbau_Elektromobilitaet/AgoraRAP2019_VerteilnetzausbauElektromobilitaet.pdf). Zugriff am: 22. Dezember 2021.
- [29] J. Antoni und J. Selinger, „ENavi: Transformation des Stromsystems: Bereitstellung von Flexibilität in der Niederspannung - Status Quo, Wechselwirkungen und Ausblick“, IKEM - Institut für Klimaschutz, Energie und Mobilität e.V., Dez. 2019. [Online]. Verfügbar unter: [https://www.ikem.de/wp-content/uploads/2020/02/20200129\\_ENavi\\_14a\\_EnWG.pdf](https://www.ikem.de/wp-content/uploads/2020/02/20200129_ENavi_14a_EnWG.pdf). Zugriff am: 22. Dezember 2021.
- [30] AG Energiebilanzen e.V., „Energieverbrauch in Deutschland im Jahr 2019“, Berlin, März 2020.
- [31] AG Energiebilanzen e. V., *Bilanzen 1990 bis 2019*. [Online]. Verfügbar unter: <https://ag-energiebilanzen.de/daten-und-fakten/bilanzen-1990-bis-2019/?wpv-jahresbereich-bilanz=2011-2020> (Zugriff am: 5. März 2022).
- [32] Umweltbundesamt, *Energieverbrauch für fossile und erneuerbare Wärme*. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.umweltbundesamt.de/daten/energie/energieverbrauch-fuer-fossile-erneuerbare-waerme#warmeverbrauch-und-erzeugung-nach-sektoren> (Zugriff am: 13. September 2021).
- [33] J. Hanson, Hg., „(De-)Zentralität in technischen Szenarien: Materialien zur Stellungnahme „Zentrale und dezentrale Elemente im Energiesystem. Der richtige Mix für eine stabile und nachhaltige Versorgung““, München, Schriftenreihe Energiesysteme der Zukunft, 2020. [Online]. Verfügbar unter: [https://energiesysteme-zukunft.de/fileadmin/user\\_upload/Publikationen/PDFs/ESYS\\_Materialien\\_De-Zentralitaet\\_technische\\_Szenarien.pdf](https://energiesysteme-zukunft.de/fileadmin/user_upload/Publikationen/PDFs/ESYS_Materialien_De-Zentralitaet_technische_Szenarien.pdf). Zugriff am: 22. Dezember 2021.
- [34] *Energielexikon*. [Online]. Verfügbar unter: [https://www.energie-lexikon.info/rebound\\_effekt.html](https://www.energie-lexikon.info/rebound_effekt.html) (Zugriff am: 22. Dezember 2021).



- [35] Statistisches Bundesamt, *Umweltökonomische Gesamtrechnung: Primärenergieverbrauch nach Produktionsbereichen*. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.destatis.de/DE/Themen/Gesellschaft-Umwelt/Umwelt/UGR/energiefluesse-emissionen/Tabellen/primaerenergieverbrauch.html;jsessionid=CC29927B6C4129547DE585F244D81E3F.live732> (Zugriff am: 22. Dezember 2021).
- [36] B. Pfluger, B. Testeegen und B. Franke, „Langfristszenarien für die Transformation des Energiesystems in Deutschland: Modul 0: Zentrale Ergebnisse und Schlussfolgerungen“. Studie im Auftrag des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie, Fraunhofer ISI, Consentec GmbH, ifeu, Sep. 2017. [Online]. Verfügbar unter: [https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Downloads/B/berichtsmodul-0-zentrale-ergebnisse-und-schlussfolgerungen.pdf?\\_\\_blob=publicationFile&v=6](https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Downloads/B/berichtsmodul-0-zentrale-ergebnisse-und-schlussfolgerungen.pdf?__blob=publicationFile&v=6). Zugriff am: 22. Dezember 2021.
- [37] J. Nitsch, „Erfolgreiche Energiewende nur mit verbesserter Energieeffizienz und einem klimagerechten Energiemarkt: Aktuelle Szenarien 2017 der deutschen Energieversorgung“, Mai 2017.
- [38] F. Ausfelder *et al.*, „Sektorkopplung“ - *Untersuchungen und Überlegungen zur Entwicklung eines integrierten Energiesystems*. München, Halle (Saale), Mainz: acetech - Deutsche Akademie der Technikwissenschaften e.V.; Deutsche Akademie der Naturforscher Leopoldina e.V. - Nationale Akademie der Wissenschaften; Union der Deutschen Akademien der Wissenschaften e.V., 2017.
- [39] bp, „Statistical Review of World Energy: 69th edition“, 2020.
- [40] B. Schminke, K. Scharte und M. Koch, „Lastverschiebungspotenziale von Haushaltsgeräten durch Smart Metering“. Fachbericht, Ruhr Universität Bochum, 2016. [Online]. Verfügbar unter: <https://omp.ub.rub.de/index.php/RUB/catalog/download/74/79/535-1?inline=1>. Zugriff am: 22. Dezember 2021.
- [41] Bundesnetzagentur, „Flexibilität im Stromversorgungssystem: Bestandsaufnahme, Hemmnisse und Ansätze zur verbesserten Erschließung von Flexibilität“, Apr. 2017.
- [42] A. Gruber, F. Biedermann, S. von Roon und L. Carr, „Regionale Lastmanagement-Potenziale stromintensiver Prozesse“ in *13. Symposium Energieinnovation*, Graz, 12.-14.02.2014.
- [43] M. Klobasa, „Dynamische Simulation eines Lastmanagements und Integration von Windenergie in ein Elektrizitätsnetz auf Landesebene unter regelungstechnischen und Kostengesichtspunkten“, ETH Zurich, 2007.
- [44] E. Zipperling, B. Dahlmann, M. Zdrallek, C. Derksen, S. Eicker und H. Serafin, „Notwendigkeit und Vermarktung von Flexibilitätsoptionen im Energiesystem der Zukunft“, *Chemie Ingenieur Technik*, Jg. 93, Nr. 4, S. 624–631, 2021, doi: 10.1002/cite.202000121.
- [45] J. Witte, Hg., *Zentrale und dezentrale Elemente im Energiesystem: Der richtige Mix für eine stabile und nachhaltige Versorgung: Stellungnahme*, 2020. Aufl. München, Halle (Saale), Mainz: acetech - Deutsche Akademie der Technikwissenschaften e. V.; Deutsche Akademie der Naturforscher Leopoldina e.V. - Nationale Akademie der Wissenschaften; Union der deutschen Akademien der Wissenschaften e. V., 2020. [Online]. Verfügbar unter: <http://nbn-resolving.org/urn:nbn:de:gbv:3:2-118767>
- [46] 50Hertz Transmission GmbH; Amprion GmbH; TenneT TSO GmbH; TransnetNW GmbH, „Netzentwicklungsplan Strom 2030: Version 2019“. Zweiter Entwurf der Übertragungsnetzbetreiber, Apr. 2019.
- [47] Energietechnische Gesellschaft im VDE (ETG), „Regionale Flexibilitätsmärkte: Marktbasierter Nutzung von regionalen Flexibilitätsoptionen als Baustein zur erfolgreichen Integration von erneuerbaren Energien in die Verteilnetze“, VDE-Studie, 2014.
- [48] V. Crastan, *Elektrische Energieversorgung 2: Energie- und Elektrizitätswirtschaft, Kraftwerktechnik, alternative Stromerzeugung, Dynamik, Regelung und Stabilität, Betriebsplanung und -führung*, 2. Aufl. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2009.
- [49] Zentralverband Elektrotechnik- und Elektroindustrie e.V., PricewaterhouseCoopers GmbH, „Studie zum Zukunftsbild Stromverteilnetze“. Im Auftrag des Zentralverbands Elektrotechnik- und Elektroindustrie e.V., 2019.
- [50] J. Magretta, „Why business models matter“ (eng), *Harvard business review*, Jg. 80, Nr. 5, 86-92, 133, 2002.
- [51] J. Giehl, H. Göcke, B. Grosse, J. Kochems und J. Müller-Kirchenbauer, „Vollaufnahme und Klassifikation von Geschäftsmodellen der Energiewende“, Jan. 2019.
- [52] Hochschule Reutlingen, *Reutlinger Diskussionsbeiträge zu Marketing & Management*. Reutlingen, 2017.
- [53] Deutsche Akademie der Naturforscher Leopoldina, „Expertise bündeln, Politik gestalten - Energiewende jetzt!: Essenz der drei Grundsatzstudien zur Machbarkeit der Energiewende bis 2050“, Berlin, Feb. 2019.

- [54] A. Osterwalder, „The Business Model Ontology: A proposition in a design science approach“, l'Ecole des HEC d l'Université de Lausanne, Lausanne, 2004.
- [55] T. Bründlinger *et al.*, „dena Leitstudie Integrierte Energiewende: Impulse für die Gestaltung des Energiesystems bis 2050“, Deutsche Energie-Agentur GmbH (dena), Berlin, Juli 2018.
- [56] Agora Energiewende, „12 Thesen zur Energiewende“. Impulse, Berlin, Nov. 2012.
- [57] C. Heinemann, D. Bauknecht und J. F. Bracker, „Working Paper: Chancen und Risiken der Digitalisierung für eine nachhaltige Energiewirtschaft - Am Beispiel von neuen Handlungsoptionen für Markt und Netz“. Öko-Institut Working Paper 05/2019, Öko-Institut e.V., Okt. 2019.
- [58] Ernst & Young GmbH, „Stadtwerkstudie 2020“, Berlin, 2020.
- [59] Deutsche Energie-Agentur GmbH (dena), „Beschaffung von Systemdienstleistungen: Herausforderungen durch das Clean Energy Package und Ergebnisse der Blindleistungskommission“. Ergebniszusammenfassung des dena-Symposiums.
- [60] M. Battaglia *et al.*, „Impuls zur aktuellen klimapolitischen Debatte: Einschätzungen auf Basis der dena-Leitstudie Integrierte Energiewende“, Deutsche Energie-Agentur GmbH (dena); Energiewirtschaftliches Institut an der Universität zu Köln (EWI), Sep. 2019.
- [61] Agora Energiewende, „Neue Preismodelle für Energie: Grundlagen einer Reform der Entgelte, Steuern, Abgaben und Umlagen auf Strom und fossile Energieträger“. Hintergrund, Berlin, 2017. [Online]. Verfügbar unter: [https://www.agora-energiewende.de/fileadmin/Projekte/2017/Abgaben\\_Umlagen/Agora\\_Abgaben\\_Umlagen\\_WEB.pdf](https://www.agora-energiewende.de/fileadmin/Projekte/2017/Abgaben_Umlagen/Agora_Abgaben_Umlagen_WEB.pdf).
- [62] A. Löschel, V. Grimm, B. Lenz und F. Staiß, „Stellungnahme zum achten Monitoring-Bericht der Bundesregierung für die Berichtsjahre 2018 und 2019“, Expertenkommission zum Monitoring-Prozess „Energie der Zukunft“, Berlin, Feb. 2021.
- [63] H. M. Henning und A. Palzer, „Was kostet die Energiewende: Wege zur Transformation des deutschen Energiesystems bis 2050“, Fraunhofer ISE, Freiburg, Nov. 2015.
- [64] C. Litz *et al.*, „Gesamtwirtschaftliche Effekte der Energiewende: Endbericht“. Projekt Nr. 31/13 des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie, Berlin, GWS-Gesellschaft für wirtschaftliche Strukturforschung; EWI - Energiewirtschaftliches Institut an der Universität zu Köln; Prognos AG, 2014.
- [65] Forum für Zukunftsenergien, Hg., *Kosten und Finanzierung der Energiewende*. Schriftenreihe des Kuratoriums Band 11, 2018.
- [66] Agora Energiewende, „Die Rolle des Emissionshandels in der Energiewende: Perspektiven und Grenzen der aktuellen Reformvorschläge“, Feb. 2015.
- [67] Local Energy Consulting, „Akzeptanz und lokale Teilhabe in der Energiewende: Handlungsempfehlungen für eine umfassende Akzeptanzpolitik“. Impuls im Auftrag von Agora Energiewende, 2020.
- [68] G. H. Haug, D. Spath und H. Hatt, *Resilienz digitalisierter Energiesysteme: Wie können Blackout-Risiken begrenzt werden?* Halle (Saale), München, Mainz: Deutsche Akademie der Naturforscher Leopoldina e. V. - Nationale Akademie der Wissenschaften; acatech - Deutsche Akademie der Technikwissenschaften e. V; Union der deutschen Akademien der Wissenschaften e. V, 2021. [Online]. Verfügbar unter: <http://nbn-resolving.org/urn:nbn:de:gbv:3:2-133492>
- [69] Energietechnische Gesellschaft im VDE (ETG), „Schutz- und Automatisierungstechnik in aktiven Verteilnetzen: Herausforderungen, Lösungskonzepte, Empfehlungen“, VDE-Studie, 2016.
- [70] T. Hess, *Digitalisierung*. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.enzyklopaedie-der-wirtschaftsinformatik.de/lexikon/technologien-methoden/Informatik--Grundlagen/digitalisierung> (Zugriff am: 23. Dezember 2021).
- [71] P. Tarkowski, *Digitalisierung: Was ist das? Eine Definition*. [Online]. Verfügbar unter: <https://digital-magazin.de/digitalisierung-definition/> (Zugriff am: 23. Dezember 2021).
- [72] Fraunhofer ISE, *Energiewende - Paradigmenwechsel und Digitalisierung*. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.ise.fraunhofer.de/de/leitthemen/energiewende-digital.html> (Zugriff am: 23. Dezember 2021).
- [73] K. Witsch, „Energie-Gipfel: So verändert 5G die Energiewelt“, *Handelsblatt*, 22. Jan. 2020, 2020. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.handelsblatt.com/unternehmen/energie/handelsblatt-energie-gipfel-warum-die-energiewende-ohne-5g-nicht-funktioniert/25459924.html?ticket=ST-13156516-g1xe2veXEUc74jdlFK2U-ap4>. Zugriff am: 23. Dezember 2021.
- [74] Verbraucherzentrale, *Smart Meter: Die neuen Stromzähler kommen*. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.verbraucherzentrale.de/wissen/energie/preise-tarife-anbieterwechsel/smart-meter-die-neuen-stromzaehler-kommen-13275> (Zugriff am: 23. Dezember 2021).
- [75] N. Allnoch, „OVG Münster stoppt Einbauverpflichtung für intelligente Messsysteme“, *IWR.de GmbH*, 9. März 2021, 2021. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.iwr.de/news/ovg-muenster-stoppt-einbauverpflichtung-fuer-intelligente-messsysteme-news37292>. Zugriff am: 23. Dezember 2021.

- [76] „BSI stoppt Smart-Meter-Rollout für 50 Stadtwerke“, *energate GmbH*, 16. März 2021, 2021. [Online]. Verfügbar unter: [https://www.energate-messenger.de/news/210512/bsi-stoppt-smart-meter-rollout-fuer-50-stadtwerke?utm\\_source=cleverpush&utm\\_medium=push&utm\\_campaign=free-news](https://www.energate-messenger.de/news/210512/bsi-stoppt-smart-meter-rollout-fuer-50-stadtwerke?utm_source=cleverpush&utm_medium=push&utm_campaign=free-news). Zugriff am: 23. Dezember 2021.
- [77] Consentec GmbH, Forschungsgemeinschaft für elektrische Anlagen und Stromwirtschaft (FGH) e.V., „Notwendiger Daten- und Informationsbedarf zur Gewährleistung einer sicheren Netz- und Systemführung im Übertragungsnetz“. Gutachten im Auftrag von 50Hertz Transmission GmbH (Auftraggeber), Amprion GmbH, Tennet TSO GmbH, Mai 2016. [Online]. Verfügbar unter: [https://www.amprion.net/Dokumente/Dialog/Downloads/Studien/Notwendiger-Daten-und-Informationsbedarf/Consentec-FGH\\_4UeNB\\_Datenbedarf-EIN\\_GA\\_komplett.pdf](https://www.amprion.net/Dokumente/Dialog/Downloads/Studien/Notwendiger-Daten-und-Informationsbedarf/Consentec-FGH_4UeNB_Datenbedarf-EIN_GA_komplett.pdf). Zugriff am: 23. Dezember 2021.
- [78] Informationstechnische Gesellschaft im VDE (ITG), „Smart Grid Security: Energieinformationsnetze und -systeme“, VDE-Positionspapier.
- [79] L. Kratochwill, P. Richard, L. Babilon, F. Rehmann, S. Mamel und S. Fasbender, „Künstliche Intelligenz - vom Hype zur energiewirtschaftlichen Realität: Vertiefte Analyse von KI-Anwendungsfeldern in der Energiewirtschaft“. dena-ANALYSE, dena Deutsche Energie-Agentur, Aug. 2020. [Online]. Verfügbar unter: [https://www.dena.de/fileadmin/dena/Publikationen/PDFs/2020/dena\\_ANALYSE\\_Kuenstliche\\_Intelligenz\\_-\\_vom\\_Hype\\_zur\\_energiewirtschaftlichen\\_Realitaet.pdf](https://www.dena.de/fileadmin/dena/Publikationen/PDFs/2020/dena_ANALYSE_Kuenstliche_Intelligenz_-_vom_Hype_zur_energiewirtschaftlichen_Realitaet.pdf). Zugriff am: 23. Dezember 2021.
- [80] *IT-Sicherheitskatalog gemäß § 11 Absatz 1a Energiewirtschaftsgesetz*, 2015. [Online]. Verfügbar unter: [https://www.bundesnetzagentur.de/SharedDocs/Downloads/DE/Sachgebiete/Energie/Unternehmen\\_Institutionen/Versorgungssicherheit/IT\\_Sicherheit/IT\\_Sicherheitskatalog\\_08-2015.pdf?\\_\\_blob=publicationFile&v=1](https://www.bundesnetzagentur.de/SharedDocs/Downloads/DE/Sachgebiete/Energie/Unternehmen_Institutionen/Versorgungssicherheit/IT_Sicherheit/IT_Sicherheitskatalog_08-2015.pdf?__blob=publicationFile&v=1)
- [81] A. Selhofer und K. Tidten, „Whitepaper Anforderungen an sichere Steuerungs- und Telekommunikationssysteme“. Vollständig überarbeitete Version 2.0, BDEW Bundesverband der Energie- und Wasserwirtschaft; Oesterreichs E-Wirtschaft, Wien, Berlin, Mai 2018. [Online]. Verfügbar unter: [https://www.bdew.de/media/documents/Awh\\_20180507\\_OE-BDEW-Whitepaper-Secure-Systems.pdf](https://www.bdew.de/media/documents/Awh_20180507_OE-BDEW-Whitepaper-Secure-Systems.pdf).
- [82] Christoph Ruland, „Zukünftige Security Anforderungen für die Energieautomatisierung“. Vortrag beim VDE Kassel, 23. Mai 2019.
- [83] Bundesamt für Sicherheit in der Informationstechnik, *Cyber-Glossar - D*. [Online]. Verfügbar unter: [https://www.bsi.bund.de/DE/Service-Navi/Cyber-Glossar/Functions/glossar.html;jsessionid=A19B00504C4910E1CAA9A7951C0A0457.internet081?nn=520190&cms\\_iv2=132772](https://www.bsi.bund.de/DE/Service-Navi/Cyber-Glossar/Functions/glossar.html;jsessionid=A19B00504C4910E1CAA9A7951C0A0457.internet081?nn=520190&cms_iv2=132772) (Zugriff am: 23. Dezember 2021).
- [84] F. Matthes, F. Flachsbarth, C. Loreck, H. Hermann, H. Falkenber und V. Cook, *Zukunft Stromsystem II Regionalisierung der erneuerbaren Stromerzeugung: Vom Ziel her denken*. Berlin, 2018.
- [85] S. Peter, „Modellierung einer vollständig auf erneuerbaren Energien basierenden Stromerzeugung im Jahr 2050 in autarken, dezentralen Strukturen“. Projektnummer 36301305, Umweltbundsamt, Climate Change 14/2013, 2013. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.oeko.de/fileadmin/oekodoc/Stromsystem-II-Regionalisierung-der-erneuerbaren-Stromerzeugung.pdf>. Zugriff am: 23. Dezember 2021.
- [86] L. Göke, C. Kemfert, M. Kendziorski und C. von Hirschhausen, *100 Prozent erneuerbare Energien für Deutschland: Koordinierte Ausbauplanung notwendig*. [Online]. Verfügbar unter: [https://www.diw.de/de/diw\\_01.c.821878.de/publikationen/wochenberichte/2021\\_29\\_1/100\\_prozent\\_erneuerbare\\_energien\\_fuer\\_deutschland\\_\\_koordinierte\\_ausbauplanung\\_notwendig.html](https://www.diw.de/de/diw_01.c.821878.de/publikationen/wochenberichte/2021_29_1/100_prozent_erneuerbare_energien_fuer_deutschland__koordinierte_ausbauplanung_notwendig.html) (Zugriff am: 23. Dezember 2021).
- [87] Energietechnische Gesellschaft im VDE (ETG), „Der Zellulare Ansatz: Grundlage einer erfolgreichen, regionenübergreifenden Energiewende“, VDE-Studie.
- [88] *Entwurf eines Gesetzes zur Änderung des Energiewirtschaftsgesetzes zur Einführung von Füllstandsvorgaben für Gasspeicheranlagen*, 2022. [Online]. Verfügbar unter: <https://dserver.bundestag.de/btd/20/010/2001024.pdf>
- [89] Energietechnische Gesellschaft im VDE (ETG), „Demand Side Integration: Lastverschiebungspotenziale in Deutschland“, 2012.

# Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1:	Skizze eines Energie-Ökosystems (eigene Darstellung)	3
Abbildung 2:	Systemstruktur und Systemgrenzen (eigene Darstellung)	10
Abbildung 3:	Systemdarstellung - Erneuerbare Energien und klimaneutraler Verkehr (eigene Darstellung)	14
Abbildung 4:	Säulen der Verkehrswende und Einordnung technischer Entwicklungen (eigene Darstellung)	16
Abbildung 5:	Die Wärmewende im Überblick (eigene Darstellung)	18
Abbildung 6:	Vergleich des resultierenden Stromverbrauchs in 2030 und 2050 (Quelle: [33])	20
Abbildung 7:	Erwartete Entwicklungen der Energieverbräuche und deren Faktoren (eigene Darstellung)	21
Abbildung 8:	Energiebedarf des Gesamtsystem nach [35], [36], [37], [38]	22
Abbildung 9:	Historisch schwach gekoppeltes System auf Basis fossiler Ressourcen (eigene Darstellung)	22
Abbildung 10:	Direkte und indirekte Sektorenkopplung (eigene Darstellung)	23
Abbildung 11:	Energiequellen, -träger und -anwendungen in einer sektorgekoppelten Zukunft (eigene Darstellung)	23
Abbildung 12:	Vergleich des inländischen Strombedarfs für indirekte Sektorenkopplung in 2050 (eigene Darstellung) Hinweis zur ESYS-Studie: Heutige Erdgas-,Wasserstoff- und PKW-Mobilitätsbedarfe werden voll durch synthetischen Wasserstoffe substituiert.	25
Abbildung 13:	Vergleich des Importbedarfs synthetischer Energieträger (eigene Darstellung)	25
Abbildung 14:	Höhe des Lastverschiebungspotenzials in Deutschland kumuliert und aufgeteilt auf die Sektoren Industrie, Haushalte sowie Gewerbe, Handel und Dienstleistungen (GHD) [41–43], (Quelle: [44])	28
Abbildung 15:	Rollen im konventionellen deutschen Elektrizitätsmarkt (eigene Darstellung nach [48, S. 111])	30
Abbildung 16:	Qualitative Relevanz von Vertragsarten und Handelsplätzen für Akteure des elektrischen Energiehandels der Zukunft (eigene Darstellung)	31
Abbildung 17:	Übersicht zu den Geschäftsmodellklassen [51]	32
Abbildung 18:	Skizze eines Energie-Ökosystems (eigene Darstellung)	33
Abbildung 19:	Geschäftsmodelle und Einflussfaktoren (nach [54])	34
Abbildung 20:	Die Geschäftsmodellklassen der Energiewirtschaft und darin enthaltene Geschäftsmodellprototypen (Quelle: [51])	35
Abbildung 21:	Geschäftsmodelle im heutigen Stromhandel und beim Peer-to-Peer Handel [57]	36
Abbildung 22:	Politische Handlungsoptionen zur Stärkung der Akzeptanz (Quelle: [67])	39
Abbildung 23:	Auswirkungen der Digitalisierung des Energiesystems (Quelle: Siemens AG)	40
Abbildung 24:	Schutzbedürfnisse nach [78]	43
Abbildung 25:	Normen und Standards für sichere Kommunikation (Quelle: [82])	44
Abbildung 25:	Nutzung verfügbarer erneuerbarer Energieressourcen auf die benötigte Transportkapazität von Nord nach Süd; links wie bisher geplant, rechts bei vollständiger Nutzung von lokal vorhandenen erneuerbaren Energieressourcen (Quelle: [87])	47
Abbildung 26:	Beispiel einer strom- und gasbasierten Energiezelle für den Bereich einer Ortsnetzstation (eigene Darstellung)	48
Abbildung 27:	Windenergieanlagen (Quelle: RMS)	49
Abbildung 28:	Photovoltaikanlage auf dem Dach eines Wohnhauses (Quelle: RMS)	50
Abbildung 29:	Geothermieanlage in Island (Quelle: RMS)	51
Abbildung 30:	Batterieelektrisches Fahrzeug beim Ladevorgang (Quelle: Mikes-Photography / Pixabay)	57
Abbildung 31:	Lastkraftwagen auf der eHighway Teststrecke (Quelle: RMS)	58
Abbildung 32:	Wärmepumpe (Quelle: Viessmann)	60



VDE Verband der Elektrotechnik  
Elektronik Informationstechnik e.V.  
Energietechnische Gesellschaft (ETG)

Merianstraße 28  
63069 Offenbach am Main  
Tel. +49 69 6308-346  
[etg@vde.com](mailto:etg@vde.com)

**VDE**