



# VISIONEN UND PFADENTSCHEIDUNGEN DER ENERGIEWENDE

GEFÖRDERT VOM

**KOPERNIKUS**  
ENavi >> **PROJEKTE**  
Die Zukunft unserer Energie



Bundesministerium  
für Bildung  
und Forschung

# 1.1 IMPRESSUM

## Herausgeber

Öko-Institut e.V.

Merzhauser Straße 173  
D-79100 Freiburg  
Tel. +49 761 45295-0  
Fax +49 761 45295-288  
www.oeko.de



## Verantwortliche Redakteure

Dr: Dierk Bauknecht ([d.bauknecht@oeko.de](mailto:d.bauknecht@oeko.de))

## Autoren

Dr. Dierk Bauknecht  
Joß Bracker  
Christoph Heinemann  
Dr. Tilman Hesse  
Peter Kasten  
Sven Kühnel  
Moritz Mottschall  
Moritz Vogel  
Öko-Institut e.V.

Dr. Sophia Becker  
Rebecca Kutzner  
Irene Müller  
Sonja Thielges  
IASS Potsdam

## Bildnachweis

Titelbild: Bildagentur

## Stand

Juli 2019

Diese Studie ist in Arbeitspaket 11 des Kopernikus-Projekts Energiewende-Navigationssystem (ENavi) entstanden.

# INHALTSVERZEICHNIS

## Inhalt

<b>2</b>	<b>Übergeordnete Transformationsziele</b>	<b>8</b>
<b>3</b>	<b>Zentrale Pfadentscheidungen</b>	<b>10</b>
<b>3.1</b>	<b>Stromsektor</b>	<b>10</b>
3.1.1.	Konstanter Strombedarf vs. stark steigender Strombedarf	10
3.1.2.	Erneuerbare Energien	17
3.1.3.	Dezentrale vs. Zentrale Steuerung	27
3.1.4.	Flexibilitätsbedarf und ausgeglichener vs. fokussierter Flexibilitätenmix	30
3.1.5.	Netzausbau vs. alternative Optionen (incl. Flexibilität)	36
3.1.6.	Entwicklungspfade fossiler Energieträger	40
<b>3.2</b>	<b>Wärmesektor</b>	<b>58</b>
3.2.1.	Verstärkt Effizienz/Dämmen vs. verstärkt erneuerbare Energien	58
3.2.2.	Verstärkter Ausbau der Wärmenetze vs. weniger Wärmenetze	67
3.2.3.	Verbot neuer fossiler Heizungen ab 2030 vs. Technologieoffenheit	73
3.2.4.	Verstärkter vs. begrenzter Einsatz von Power-to-Heat Technologien	77
<b>3.3</b>	<b>Verkehrssektor</b>	<b>81</b>
3.3.1.	Umstieg auf elektrische Antriebe und / oder Effizienzsteigerung verbrennungsmotorischer Antriebe	82
3.3.2.	Umstieg auf eine erneuerbare Energieversorgung des Verkehrs	89
3.3.3.	Nutzerverhalten und Mobilitätsdienstleistungen: Sharing und multimodale Mobilität im urbanen Kontext	98
3.3.4.	Stadtplanung und Umbau der Verkehrsinfrastruktur in Städten: mehr Nahmobilität und Radverkehr	101
3.3.5.	Verkehrsvermeidung und -verlagerung auf langen Strecken	106
<b>3.4</b>	<b>Sektorübergreifende Fragestellungen</b>	<b>111</b>
3.4.1.	Sektorkopplung Elektrifizierung vs. synthetische Brennstoffe	111
3.4.2.	Bioenergie im Stromsektor vs. Wärmesektor vs. Verkehrssektor	117
<b>4</b>	<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>121</b>

## 1.2 ABBILDUNGSVERZEICHNIS

Abbildung 1: Schematische Darstellung von Pfadentscheidungen und Zielsystemen (Quelle: enavi)	7
Abbildung 2: Quantitative Ziele der Energiewende und Status Quo (2015) (Quelle: BMWi (2016b, S. 7))	8
Abbildung 3: % THG Emissionen ggü. 1990. (Quelle: Eigene Darstellung)	9
Abbildung 4: Stromverbrauch (Netto, inkl. Netzverluste) in verschiedenen Szenarien in 2050 (Quelle: Gerhardt & Sandau, 2015)	13
Abbildung 5: Anteile erneuerbarer Energien an der Stromerzeugung in unterschiedlichen Studien (Quelle: Eigene Darstellung. Basierend auf (Nitsch et al., 2011), (Schlesinger et al., 2014a), (Repenning et al., 2015a), (Bernath et al., 2017b))	19
Abbildung 6: Vergleich der installierten erneuerbaren Leistung verschiedener Studien in 2030 (Quelle: Eigene Darstellung basierend auf: (50 Hertz et al., 2017; Matthes et al., 2018; RLI & BEE, 2013; Timpe et al., 2018).)	22
Abbildung 7: Übersicht der Stromerzeugung verschiedener Studien im Jahr 2050 in TWh/a (Quelle: Eigene Darstellung basierend auf (BMU, 2010; Fraunhofer ISI et al., 2017; Öko-Institut & Fraunhofer ISI, 2015a; Schlesinger et al., 2014a)	23
Abbildung 8: Verteilung der Wind onshore Anlagenleistung in GW in ausgewählten Szenarien für das Jahr 2040 und 100% EE (Quelle: Eigene Darstellung basierend auf (RLI & BEE, 2013))	27
Abbildung 9: Übersicht über die Entwicklung der Residuallast im Jahr 2030 (50% EE) und 2050 (80% EE) verschiedener Studien (Quelle: Eigene Darstellung basierend auf (BEE, 2013; Fraunhofer IWES et al., 2014; Fraunhofer IWES et al., 2015; UBA, 2015a))	31
Abbildung 10: Vergleich zur Entwicklung der fossilen KWK-Stromerzeugung in verschiedenen Klimaschutzszenarien (Quelle: Sensfuß et al., 2017)	51
Abbildung 11: Übersicht über den Strombedarf für die Elektrolyse und Methanisierung erneuerbarer Energieträger im Jahr 2050 (Quelle: Eigene Darstellung basierend auf (DLR et al. 2012; Fraunhofer ISE 2012, 2012; Öko-Institut e.V. & Fraunhofer ISI 2015b; UBA 2010))	57
Abbildung 12: Darstellung des Zielbereichs zur Erreichung einer 80% bzw. 95% Reduktion des nicht-erneuerbaren Primärenergieverbrauchs im Gebäudereich (Quelle: Öko-Institut)	61
Abbildung 13: Erträge und Deckungsanteile der Solarthermie in Abhängigkeit von Nutzwärmeverbrauch (Quelle: Jochum et al. (2017))	63
Abbildung 14: Potenziale für den Bau neuer Nahwärmenetze (Quelle: Jochum et al. (2017))	69

## 1.3 TABELLENVERZEICHNIS

Tabelle 1: Übersicht über mögliche Entwicklungen des Strombedarfs (Quelle: Eigene Darstellung)	11
Tabelle 2: Übersicht über die Emissionsreduktionsziele und dafür notwendige Anteile erneuerbarer Erzeugung im Stromsektor (Quelle: Eigene Darstellung)	17
Tabelle 3: Übersicht der Ausgestaltungsmöglichkeiten der Struktur der erneuerbaren Erzeugung (Quelle: Eigene Darstellung)	21
Tabelle 4: Übersicht über mögliche Verteilungsformen erneuerbarer Energien. (Quelle: Eigene Darstellung)	25
Tabelle 5: Übersicht über mögliche Steuerungsformen des Stromsektors (Quelle: Eigene Darstellung)	28
Tabelle 6: Übersicht über Flexibilitätsoptionen (Quelle: Eigene Darstellung)	31
Tabelle 7: Übersicht über Gestaltungsformen des Flexibilitätsmix (Quelle: Eigene Darstellung)	34
Tabelle 8: Übersicht über potenzielle Alternativen zum Netzausbau (Eigene Darstellung)	36
Tabelle 9: Übersicht der Ausgestaltungsmöglichkeiten eines Kohleausstiegs (Quelle: Eigene Darstellung)	40
Tabelle 10: Übersicht der Ausgestaltungsmöglichkeiten fossiler KWK-Erzeugung (Quelle: Eigene Darstellung)	47
Tabelle 11: Mögliche zukünftige Rolle der Gasnetze (Quelle: Eigene Darstellung)	54
Tabelle 12: Übersicht der Ausgestaltungsmöglichkeiten von Wärmedämmung und erneuerbaren Energien (Quelle: Eigene Darstellung)	59

Tabelle 13: Vergleich der beiden Ausgestaltungsvarianten hinsichtlich der benötigten Anstrengungen für unterschiedliche Treibhausgas-Reduktionsziele (Quelle: Öko-Institut)	63
Tabelle 14: Übersicht Ausgestaltungsmöglichkeiten Wärmenetze (Quelle: Eigene Darstellung)	67
Tabelle 15: Übersicht Ausgestaltungsmöglichkeiten Ausstieg aus fossilen Heizungstechnologien (Quelle: Eigene Darstellung)	73
Tabelle 16: Übersicht Ausgestaltungsmöglichkeiten Power-to-heat im Gebäudebereich (Quelle: Eigene Darstellung)	77
Tabelle 17: Übersicht über Möglichkeiten der Umstellung auf alternative Antriebe (Quelle: Eigene Darstellung)	83
Tabelle 18: Übersicht der Ausgestaltungsmöglichkeiten eines Umstiegs auf eine erneuerbare Energieversorgung des Verkehrs (Quelle: Eigene Darstellung)	89
Tabelle 19: Übersicht über erneuerbare Energieversorgungsoptionen differenziert nach Verkehrsmittel (Quelle: Eigene Darstellung auf Basis von (Schmied et al., 2014)) und (Kasten et al., 2016))	92
Tabelle 20: Übersicht über Möglichkeiten der Emissionsreduktion durch Sharing und Multimodalität im urbanen Kontext (Quelle: Eigene Darstellung)	98
Tabelle 21: Übersicht über Möglichkeiten der Emissionsreduktion durch Stadtplanung und Verkehrsinfrastruktur (Quelle: Eigene Darstellung)	102
Tabelle 22: Übersicht über Möglichkeiten der Verkehrsvermeidung und – verlagerung auf langen Strecken (Quelle: Eigene Darstellung)	106
Tabelle 23: Übersicht der grundsätzlichen Ausgestaltungsmöglichkeiten im Bereich Sektorkopplung (Quelle: Eigene Darstellung)	111
Tabelle 24: Beispielhafte Gesamtwirkungsgrade der Nutzung von erneuerbarem Strom in unterschiedlichen Umwandlungspfaden (Quelle: eigene Zusammenstellung auf Basis von (Agora Verkehrswende & Agora Energiewende, 2018))	115
Tabelle 25: Relevante neue Infrastrukturen in unterschiedlichen Sektorkopplungspfaden (Quelle: Öko-Institut)	116
Tabelle 26: Übersicht der Ausgestaltungsmöglichkeiten im Bereich Bioenergie (Quelle: Eigene Darstellung)	117
Tabelle 27: Biomasseeinsatz 2015 und erschließbare Biomassepotenziale 2020 und 2050 (Quelle: (Brosowski et al., 2015), (AGEB, 2017), eigene Berechnungen Öko-Institut e.V)	118

# EINLEITUNG

Dieses Papier stellt verschiedene Visionen der Energiewende dar, indem es zunächst die wichtigsten Einzelentscheidungen auf dem Weg zu den Energiewendezielen darstellt. Fokus ist also nicht die Darstellung konsistenter Visionen der Energiewende. Vielmehr entsteht als Beitrag zum Energiewende-Navigationssystem ENavi eine Landkarte, auf der die wichtigsten einzelnen Verzweigungspunkte dargestellt werden. Dies sind typischerweise Technologieentscheidungen, die aber immer auch eingebettet sind in weitergehende gesellschaftliche Veränderungen.

Die Wechselwirkungen zwischen den einzelnen Verzweigungspunkten sollen dann in einem zweiten Schritt untersucht werden. Dies kann dann auch als eine Grundlage für die Entwicklung und Diskussion konsistenter Gesamtvisionen dienen.

Der Fokus liegt zunächst auf einzelnen Richtungsentscheidungen, und nicht der Darstellung ganzer Pfade zu den Energiewendezielen. Nichtsdestotrotz ist es auch hier immer wieder notwendig, die Einzelentscheidungen auch zeitlich einzuordnen und zu bewerten und in den Kontext der Entwicklung hin zu den Energiewendezielen zu stellen.

Mit Blick auf die folgende Abbildung konzentriert sich die Analyse also auf die Verzweigungspunkte, behält den Kontext der Landkarte aber im Blick. Ziel ist es, einen Gesamtüberblick über die wichtigen Verzweigungspunkte zu bekommen. In diesem Sinne ist die Darstellung top-down und nicht bottom-up, von den einzelnen Verzweigungspunkten herkommend.

Die in diesem Papier erarbeiteten Entscheidungspunkte der Energiewende fanden Eingang in AP 1 des ENavi-Projekts. Dort wurden sie für die Auswertung in einer Cross Impact Balance Matrix genutzt. Die möglichen Ausgestaltungsmöglichkeiten für unterschiedliche Entscheidungspunkte, die in diesem Papier erarbeitete worden sind, wurden so zu konsistenten Technosphären zusammengefasst. So entstanden verschiedene, konsistente technologische Ausgestaltungen für die Energiewende, die als Input für das Energiewendenavigationssystem dienen können. Diese Technosphären wurden in AP 1 zudem mit gesellschaftlichen Leitbildern abgeglichen.

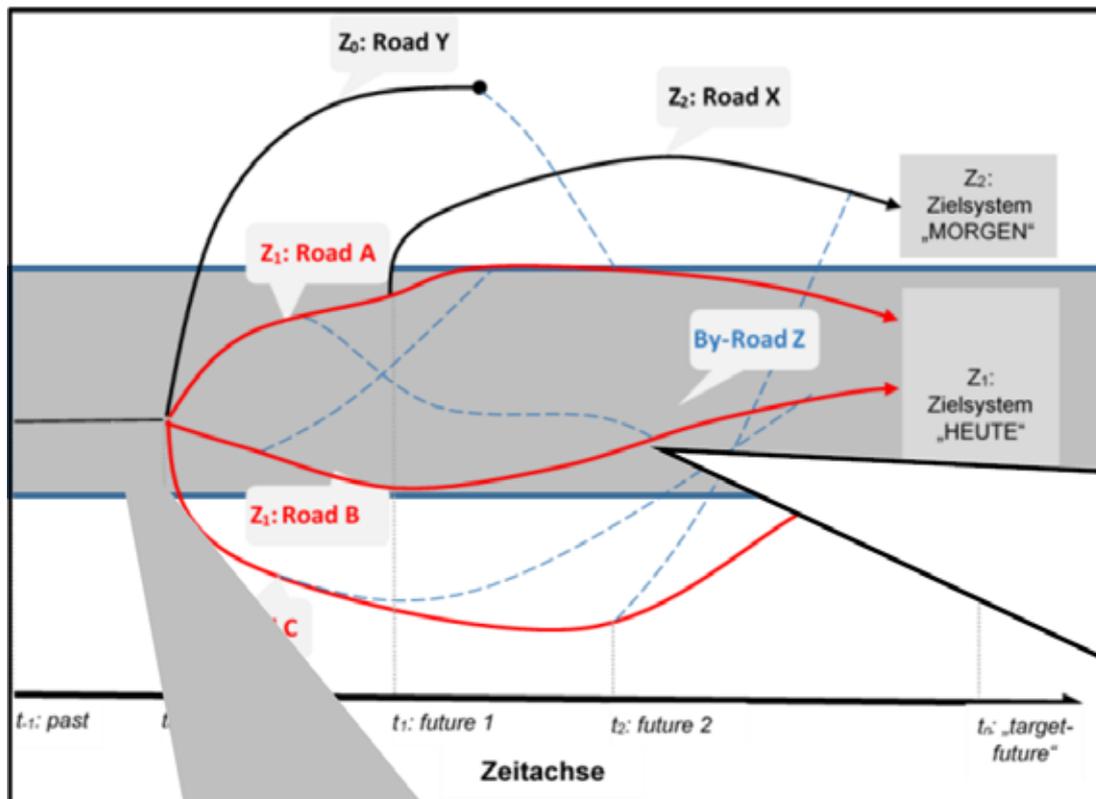


Abbildung 1: Schematische Darstellung von Pfadentscheidungen und Zielsystemen (Quelle:enavi)

Ziel ist es wichtige Verzweigungsmöglichkeiten darzustellen einschließlich der Argumente für die eine oder andere Richtung. Daraus werden aber keine Empfehlungen abgeleitet. Einzelne Abzweigungen führen allerdings dazu, dass die Energiewendeziele voraussichtlich nicht erreicht werden können. Dennoch werden auch diese Optionen dargestellt, wenn sie in der Diskussion eine wichtige Rolle spielen, wie zum Beispiel ein langsamer Kohleausstieg.

Die dargestellten Optionen repräsentieren die aus heutiger Sicht wichtigsten Entscheidungsfragen, die sich bei der wissenschaftliche Erstellung von Energieszenarien stellen oder die in der aktuellen Diskussion eine prominente Rolle spielen. Dabei werden auch die Positionen wichtiger Stakeholder dargestellt, ohne dass die Darstellung auf einer Diskursanalyse beruht.

Die Analyse beruht vor allem auf der Analyse wissenschaftlicher Studien und wichtigen Stakeholder-Dokumenten. Zwischenergebnisse werden im Rahmen von ENavi-Workshops mit Stakeholdern diskutiert.

Die einzelnen Kapitel orientieren sich an der folgenden Struktur:

- Fragestellung des Kapitels/Problemaufriss
- Beschreibung der unterschiedlichen Ausgestaltungsmöglichkeiten
- Gegenüberstellung der unterschiedlichen Ausprägungen
- Stakeholder Meinungen und Praxisinput

## 2 ÜBERGEORDNETE TRANSFORMATIONSZIELE

Die Analyse einzelner Pfadentscheidungen in Kapitel 3 findet vor dem Hintergrund der Ziele der Energiewende statt. Neben den einzelnen Argumenten für oder gegen einzelne Pfade geht es vor allem auch darum, wie einzelne Pfadentscheidungen und die damit eingeschlagenen Pfade dazu beitragen können, die Ziele der Energiewende zu erreichen. Aus dieser Perspektive können Pfadentscheidungen, die einzeln betrachtet sinnvoll erscheinen, möglicherweise negativer bewertet werden, da sich dann die Frage stellt, wie sie in der Gesamtperspektive langfristiger, übergeordneter Transformationsziele zu bewerten sind. Die Perspektive „Vom Ziel her denken“ wurde zum Beispiel mit der Studie „Modell Deutschland“ genauer untersucht (Matthes 2009).

Deshalb sollen diese Ziele hier einleitend kurz dargestellt werden. Sie sind auch Grundlage für die Bewertung von Policy packages in Enavi, insbesondere nach dem Kriterium der Effektivität. Die nachfolgende Tabelle zeigt die offiziellen energiepolitischen (Wende-)Ziele der Bundesregierung.

	2015	2020	2030	2040	2050
<b>Treibhausgasemissionen</b>					
Treibhausgasemissionen (gegenüber 1990)	-27,2 %*	mindestens -40 %	mindestens -55 %	mindestens -70 %	-80 % bis -95 %
<b>Erneuerbare Energien</b>					
Anteil am Bruttoendenergieverbrauch	14,9 %	18 %	30 %	45 %	60 %
Anteil am Bruttostromverbrauch	31,6 %	mindestens 35 %	mindestens 50 % EEG 2025: 40 bis 45 %	mindestens 65 % EEG 2035: 55 bis 60 %	mindestens 80 %
Anteil am Wärmeverbrauch	13,2 %	14 %			
Anteil im Verkehrsbereich	5,2 %	10 %**			
<b>Effizienz und Verbrauch</b>					
Primärenergieverbrauch (gegenüber 2008)	-7,6 %	-20 %			
Endenergieproduktivität (2008–2050)	1,3 % pro Jahr (2008–2015)	2,1 % pro Jahr (2008–2050)			
Bruttostromverbrauch (gegenüber 2008)	-4,0 %	-10 %			
Primärenergiebedarf Gebäude (gegenüber 2008)	-15,9 %				
Wärmebedarf Gebäude (gegenüber 2008)	-11,1 %	-20 %			
Endenergieverbrauch Verkehr (gegenüber 2005)	1,3 %	-10 %			

Abbildung 2: Quantitative Ziele der Energiewende und Status Quo (2015) (Quelle: BMWi (2016b, S. 7))

Deutschland hat sich das Ziel gesetzt, die Treibhausgasemissionen in Deutschland sektorübergreifend bis 2050 um 80-95 % gegenüber 1990 zu reduzieren – mit Zwischenzielen in 2020 (-40%), 2030 (-55%) und 2040 (-70%).

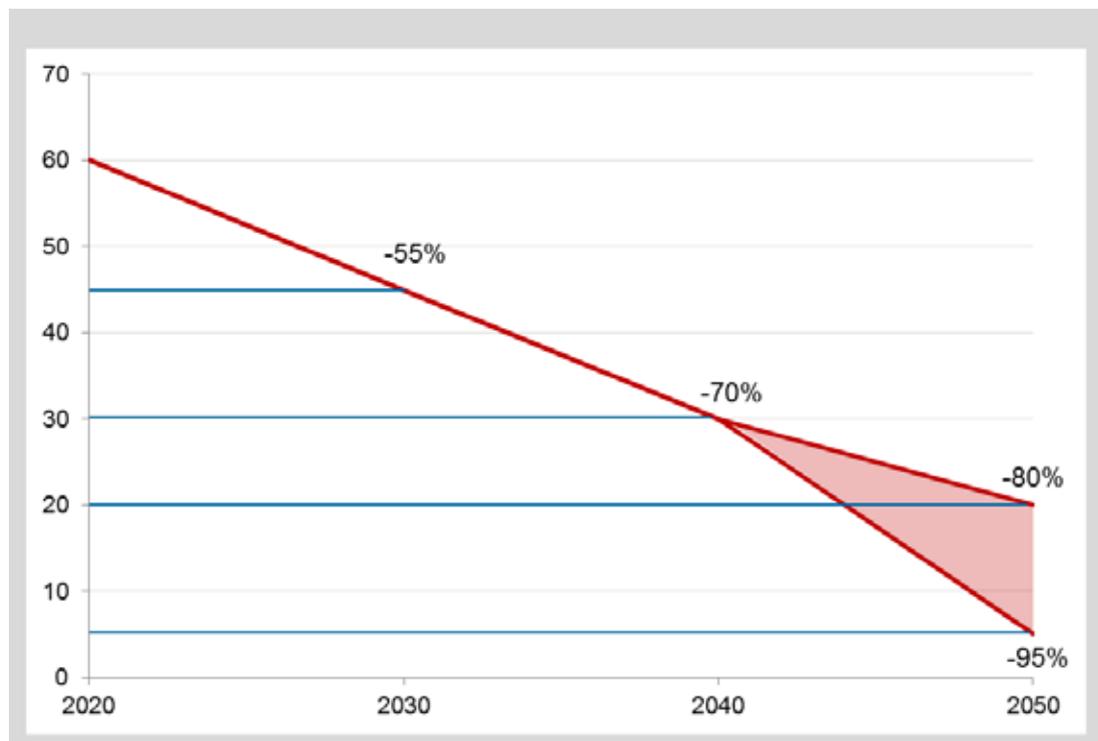


Abbildung 3: % THG Emissionen ggü. 1990. (Quelle: Eigene Darstellung)

Das Ziel der Senkung der CO<sub>2</sub>-Emissionen auf 732 Mio. t CO<sub>2</sub> bis 2020 wird nach einhelliger Meinung verfehlt, so dass danach umso größere Reduktionen erforderlich sind.

Hinzu kommt, dass auf der UN-Klimakonferenz in Paris (COP 21) im Dezember 2015 das Übereinkommen getroffen wurde, die globale Erwärmung auf deutlich unter 2 °C, möglichst 1,5 °C im Vergleich zum vorindustriellen Niveau zu begrenzen. Um mit einer Wahrscheinlichkeit von 66% eine Begrenzung der weltweiten Temperaturerhöhung auf unter 2°C zu erreichen, muss die ab 2015 insgesamt ausgestoßene CO<sub>2</sub>-Menge weltweit auf etwa 890 Mrd. t begrenzt werden (IPCC 2014: 64). In dieser Budget-Perspektive geht es nicht nur um den Endpunkt des Reduktionspfades, sondern vor allem auch um die Summe aller Emissionen in den einzelnen Jahren, mithin also auch um die Steilheit des Reduktionspfades.

Bisher gibt es zwischen den Staaten keine Einigung, wie das verbleibende globale Emissionsbudget auf die einzelnen Staaten allokiert werden soll. Ein diskutierter und für Deutschland tendenziell vorteilhafter Verteilschlüssel nimmt die Aufteilung des verbleibenden CO<sub>2</sub>-Emissionsbudgets auf der Grundlage einer globalen Pro-Kopf-Verteilung mit aktuellem Bevölkerungsstand vor. Demnach stünde Deutschland mit einem Anteil an der Weltbevölkerung von 1,1 % in 2015 seit Anfang des Jahres 2015 noch ein Emissionsbudget von etwa 9,9 Mrd. t CO<sub>2</sub> zur Verfügung. Mit dieser Verteilung erfordert die Einhaltung des 2°C-Ziels eine deutlich stärkere Reduktion bis 2030 im Vergleich zum oben dargestellten Reduktionspfad: Bei linearer jährlicher Minderung müssen die CO<sub>2</sub>-Emissionen bis 2030 um 82% auf ein Niveau von 219 Mio. t CO<sub>2</sub> reduziert werden, bis 2035 müssen die Emissionen auf null reduziert sein.

Bei den Zielen geht damit nicht nur um die langfristigen Ziele für 2050, sondern es geht auch um die Frage, wie wann welche Ziele erreicht werden sollen und wie schnell die Energiewende mithin umgesetzt werden soll.

Neben den oben genannten Energiewendezielen sind auch weitere Aspekte zu berücksichtigen, u.a. Soll die Energiewende möglichst effizient umgesetzt werden bzw. inwieweit sollen auch eine verstärkte Partizipation und Demokratisierung als eigenständige Ziele der Energiewende definiert werden? Welche Rolle spielen Versorgungssicherheit und Resilienz als eigenständige Ziele der Energiewende? Diese Aspekte werden bei der Darstellung von Leitmotiven der Energiewende in AP 1 aufgegriffen.

# 3 ZENTRALE PFADENTSCHEIDUNGEN

Das Energiesystem ist unterteilt in die drei Sektoren Strom, Wärme und Verkehr. Die in diesen Systembereichen zu findenden notwendigen Richtungsentscheidungen sollen im Folgenden genauer erläutert und mögliche Entscheidungsmöglichkeiten beschrieben werden. Ergänzendn hierzu sollen zentrale Positionen des öffentlichen Diskurses kurz dargestellt werden.

## 3.1 STROMSEKTOR

### 3.1.1. **Konstanter Strombedarf vs. stark steigender Strombedarf**

Tabelle 1: Übersicht über mögliche Entwicklungen des Strombedarfs (Quelle: Eigene Darstellung)

Möglichkeit	Beschreibung	Pro	Contra	
Stark steigender Stromverbrauch	<ul style="list-style-type: none"> <li>Starker Anstieg auf über 700 TWh in 2050</li> <li>Große Nachfrage aus dem Verkehrssektor (E-Mobilität)</li> <li>Große Nachfrage aus dem Wärmesektor (Wärmepumpen, PtH)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Elektrifizierung als wesentliche Dekarbonisierungsstrategie im Wärme – und Mobilitätssektor möglich</li> <li>Suffizienzstrategien nur im geringen Umfang notwendig</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Zusätzlicher EE-Ausbau notwendig, um EE-Ziele zu erreichen. Dies führt zu zusätzlicher Flächenverbrauch / Akzeptanzbedarf.</li> <li>Zusätzlicher Flexibilitätsbedarf durch fluktuierende Erzeugung.</li> <li>Größerer Bedarf an Netzausbau und weiteren Infrastrukturen.</li> </ul>	
	Moderat steigender Stromverbrauch	<ul style="list-style-type: none"> <li>Keine starke Steigerung des Stromverbrauchs (bis 650 TWh)</li> <li>Entwicklung in den Verbrauchssektoren (alt+neu) gleichen sich ungefähr aus.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Suffizienzstrategien nur im geringen Umfang notwendig</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Geringes Potential für „Elektrifizierung“ als Dekarbonisierungsstrategie im Wärme- und Mobilitätssektor</li> </ul>
		Gleichbleibender oder sinkender Stromverbrauch	<ul style="list-style-type: none"> <li>Stagnation oder Absinken des Stromverbrauchs unter 550 TWh in 2050</li> <li>keine wesentlichen neuen Verbraucher im Wärme- und Mobilitätssektor</li> <li>Implementierung von Effizienzmaßnahmen in Industrie/Gewerbe/Haushalte</li> <li>Implementierung von Suffizienzstrategien</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>EE-Ziele können leichter erreicht werden</li> <li>weniger Flächenbedarf</li> <li>geringerer lokaler Widerstand gegen EE-Ausbau</li> <li>geringe Förderkosten für EE-Ausbau</li> </ul>
<b>Unsicherheit und externe Treiber</b>				

- 
- Verfügbarkeit des Imports von Biomasse und EE-Strom zur Nutzung im Verkehrssektor
  - Entwicklung des Import/Export-Saldos
- 

### **Wechselwirkungen mit anderen Richtungsentscheidungen**

---

- Klimaschutzstrategien im Verkehrssektor (u.a. synthetische Kraftstoffe) (vgl. Kapitel Sektorkopplung Elektrifizierung vs. synthetische Brennstoffe)
  - Klimaschutzstrategien im Wärmesektor (vgl. Kapitel Verstärkter vs. begrenzter Einsatz von Power-to-Heat Technologien)
  - Rolle von Bioenergie / Verfügbarkeit von Biomasse (national und Import) (vgl. Kapitel Bioenergie im Stromsektor vs. Wärmesektor vs. Verkehrssektor)
-

## Fragestellung/Problemaufriss

Die Diskussion über die Erreichung der Klimaschutzziele im Stromsektor fokussiert stark auf die Erreichung bestimmter EE-Anteile bis 2030/2050. Ein entscheidender Aspekt für die Erreichung dieser Ziele, welcher deutlich weniger in der Diskussion steht, ist dabei die Bezugsgröße dieser Ziele – die absolute Höhe des Stromverbrauchs. Über die Frage, wieviel Strom in Jahr 2050 in Deutschland erzeugt werden muss, um die Nachfrage zu decken, existiert kein Konsens, und die Stromverbrauchsniveaus in den verschiedenen Klimaschutzzszenarien divergieren stark. Dabei ist die Höhe des Stromverbrauchs für zahlreiche Aspekte der Transformation des Energiesystems ein äußerst relevanter Faktor. So wirkt sich die absolute Höhe des Stromverbrauchs direkt auf die möglichen Dekarbonisierungsstrategien im Verkehrs- und Wärmesektor aus bzw. wird von diesen zentral beeinflusst. Zudem steigt mit dem Stromverbrauch auch der Flexibilitäts- und Speicherbedarfs des Stromsystems und erhöht ebenso den notwendigen Netzausbau sowie Flächen- und Ressourcenbedarf. Darüber hinaus kann die Höhe des Strombedarfs sich auch auf die Import-Abhängigkeit auswirken.

Grund für die stark divergierenden Angaben zur möglichen Entwicklung des Stromverbrauchs sind die Unsicherheiten bzgl. der Entwicklung der relevanten Einflussfaktoren. Grundsätzlich wirken zwei gegensätzliche Trends auf den Stromverbrauch ein. Zum einen führen Effizienzsteigerungen in den traditionellen Verbrauchssektoren (Industrie, Gewerbe, Haushalte) tendenziell zu einer Senkung des Strombedarfs. In vielen Szenarien wirkt dieser Trend besonders stark bis 2030. Zum anderen führen neue Verbraucher aus dem Verkehrs- und Wärmesektor zu einer in vielen Szenarien starken Steigerung der Nachfrage und überkompensieren ab 2030 in vielen Szenarien die erzielten Einsparungen durch Effizienzgewinne. In zahlreichen Szenarien erreichen diese neuen Verbraucher im Jahr 2050 einen Anteil am Gesamtstromverbrauch von 25 bis über 40% (z.B. Klimaschutzzszenarien (Öko-Institut & Fraunhofer ISI, 2015b)).

Aufgrund der stärker werdenden Interaktion zwischen den verschiedenen Sektoren sind Sektorübergreifende Szenarien für aussagekräftige Angaben zur langfristigen Entwicklung des Strombedarfs notwendig. Gerhardt & Sandau, 2015 untersucht vier Studien, die Szenarien mit einem Treibhausgas-Emissionsreduktionsziels von minus 80% CO<sub>2</sub>-Äquivalenten. (Gerhardt & Sandau, 2015) untersucht vier Studien, die Szenarien mit einem Treibhausgas-Emissionsreduktionsziels von minus 80% CO<sub>2</sub>-Äquivalenten gegen 1990 bis 2050 beinhalten. Die folgende Abbildung illustriert das Spektrum der absoluten Höhe des Stromverbrauchs in 2050 in den untersuchten Szenarien, welches von 462 TWh (Energierferenzszenario von Prognos, EWI, GWS, Zielszenario 2050) bis 788 TWh (Interaktion EE-Strom, Wärme und Verkehr von Fh-IWES, Fh-IBP, Basisszenario 2050) reicht. Die genannten Szenarien bilden gut die Brandbreite der Niveaus der Angaben zum Stromverbrauch in 2050 in anderen energiewirtschaftlichen Studien der letzten Jahre ab (siehe hierzu auch (AEE, 2016)).

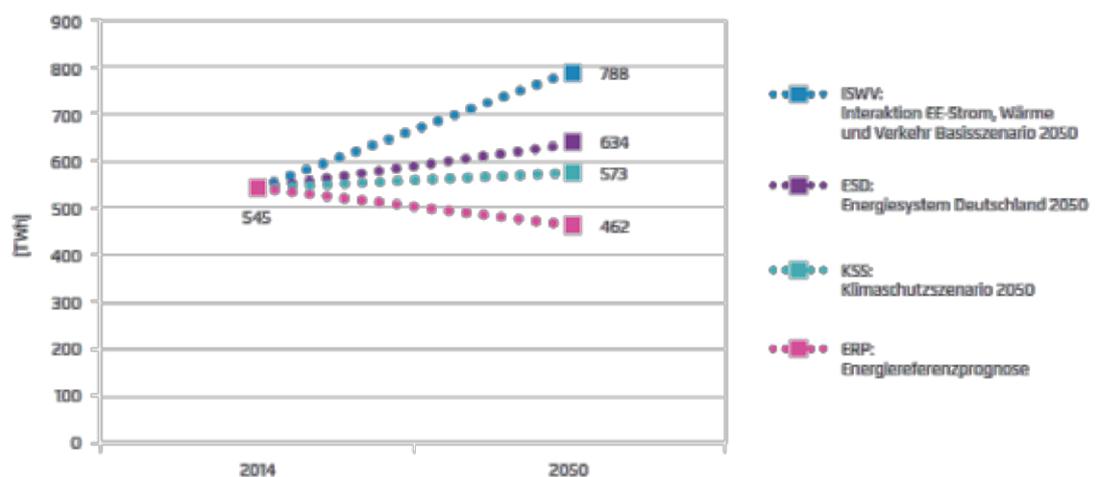


Abbildung 4: Stromverbrauch (Netto, inkl. Netzverluste) in verschiedenen Szenarien in 2050 (Quelle: Gerhardt & Sandau, 2015)

Jedoch beinhalten zahlreiche Studien auch Szenarien bei denen der Stromverbrauch in 2050 über 800 TWh und teilweise über 1.000 TWh liegt (z.B. *Klima 2050* von Nitsch, 2016). Zum Vergleich: In DLR et

al., 2015 wird 1.000 TWh als technisches Stromerzeugungspotential aus erneuerbaren Energien in Deutschland angegeben.

Die Entwicklung des Stromverbrauchs in Deutschland hängt dabei von folgenden Haupteinflussfaktoren ab (Gerhardt & Sandau, 2015):

#### Interpretation der Klimaziele bzw. das Ziel der zulässigen energetischen Emissionen in 2050.

Hierbei ist insbesondere von Bedeutung, ob eine Reduzierung der CO<sub>2</sub>-Emissionen um 80% oder 95% im Jahr 2050 angestrebt wird. In Ziel-Szenarien mit einem anspruchsvolleren Emissionsreduktionsziel werden oftmals größere Teile fossiler Brennstoffe durch strombasierte Gase und Kraftstoffe ersetzt. Dies führt bei einer inländischen Produktion ceteris paribus zu einer Steigerung des inländischen Strombedarfs. Zum Vergleich: Die Differenz zwischen dem KS80 und KS95-Szenario des ÖI/ISI beträgt 224 TWh.

#### Die Verfügbarkeit und die Nutzungsintensität von Biomasse.

Bei einer niedrigeren Verfügbarkeit von Biomasse und somit auch eine entsprechend geringen Nutzung (insb. im Verkehrssektor), muss der entsprechende Energiebedarf durch die Nutzung von strombasierten Kraftstoffen ausgeglichen werden, welches wiederum einem höheren Stromverbrauch führt. Welche Mengen an inländisch produzierter und importierter Biomasse im Jahr 2050 zur Verfügung stehen bzw. genutzt werden, beeinflusst daher ebenso den Strombedarf.

#### Energiebedarf neuer Verbraucher (Verkehr und Wärme)

Aufgrund von geringen Potentialen erneuerbarer Wärmetechnologien ohne Stromnutzung und der begrenzten Verfügbarkeit von Biomasse ist zu erwarten, dass Strom zu einem „Primärenergie“ für den Wärme- und Verkehrssektor wird (AEE, 2016). Die Nutzung von erneuerbarem Strom ist daher die wesentliche Dekarbonisierungsstrategie im Verkehrs- und Wärmesektor. Somit wirken sich die Entwicklung der Verkehrsleistung und des Wärmebedarfs direkt auf den Strombedarf aus. Aufgrund der Effizienzunterschiede zwischen der direkten und indirekten Stromnutzung (Batterieelektrische-Pkw/Oberleitungs-Lkw, PtH bzw. PtG und PtL-Technologien) ist die Entwicklung der Anteile der jeweiligen Technologie ebenso entscheidend für die Entwicklung des Strombedarfs.

#### Entwicklung des herkömmlichen Stromverbrauchs heutiger Verbraucher

Inwieweit der herkömmliche Stromverbrauch heutiger Verbraucher ihren Strombedarf durch Effizienz- und Suffizienzstrategien senken können, hat auch einen relevanten Einfluss auf den Gesamtstrombedarf. Als Ziel-Parameter wird hier in vielen Studien das Effizienzziel der Bundesregierung herangezogen, welches eine Reduktion um 25% bis 2050 definiert.

#### Verfügbarkeit von EE-Stromimporten

Besteht die Möglichkeit eine größere EE-Strommenge aus dem europäischen Ausland oder EE-strombasierte Kraftstoffe aus dem außereuropäischen Ausland zu importieren, kann damit die notwendige inländische Stromerzeugung gesenkt werden. So wird in manchen Szenarien ein Stromimport von bis zu 76 TWh angenommen (KS80 ÖI).

## **Beschreibung der Ausgestaltungsmöglichkeiten**

### *Stark steigender Stromverbrauch*

Bei dieser Entwicklungsoption steigt der Stromverbrauch auf über 700 TWh im Jahr 2050 und damit sehr stark im Vergleich zum heutigen Niveau.<sup>1</sup> Zahlreiche Klimaschutz-Szenarien verschiedener Studien beinhalten einen solch hohen Stromverbrauch. Hierzu gehören u.a. KSZ 95 (Öko-Institut), Basis-Szenario in Interaktion EE-Strom, Wärme Verkehr (IWES), PtG im Verkehr Szenario 3 (DLR/ifeu). Treiber der stark wachsenden Nachfrage ist hierbei insbesondere der Verkehrssektor, welcher durch hohe Anteile batterie-elektrischer Pkw und Oberleitungs-Lkw eine hohe direkte Stromnutzung erreichen (siehe hierzu auch Kapitel 0). Hinzu kommen Verlagerungseffekte des Güter- und Personenverkehrs von der Straße auf die Schiene. Auch wenn diese Technologien im Vergleich zu konventionellen Antrieben und der Nutzung von synthetischen Kraftstoffen relativ effizient sind, so führt deren Nutzung dennoch zu einem starken Stromanstieg. Dies ist insbesondere dann der Fall, wenn sich die absolute Verkehrsleistung nicht durch anderweitige Klimaschutzstrategien verringert (z.B. Verringerung des motorisierten Individualverkehrs durch ÖPNV, Fahrgemeinschaften oder sinkenden Mobilitätsbedarf). Wird im Verkehr eine Dekarbonisierung durch die starke Nutzung von synthetischen Kraftstoffen er-

---

<sup>1</sup> Auch wenn Szenarien mit einem Stromnachfrageanstieg über 1.000 TWh existieren, wird sich hier auf die wissenschaftlich relevantesten und technisch-realistischeren Szenarien fokussiert und diese Entwicklungsoption hier daher nicht weiter betrachtet.

reicht, ist dies mit einem enormen weiteren Strombedarf verbunden. So wird in manchen Szenarien allein für die P2X Produktion für den Verkehrssektor über 100 TWh benötigt (z.B. ESD-Szenario in Fraunhofer ISE, 2013, Hacker et al., 2014).

Im Wärmesektor werden bei fast allen Klimaschutzszenarien hohe Energieeffizienzgewinne durch starke Dämmmaßnahmen angenommen, dennoch sinkt der absolute Strombedarf im Wärmesektor nicht. Grund hierfür ist der Umstellung von fossilen Brennstoffen auf strombasierte Prozesse (Wärmepumpen, Power-to-Heat in Haushalten und GHD sowie für Hochtemperatur-Prozesse in der Industrie) (Gerhardt & Sandau, 2015).

Wird ein stark steigender Stromverbrauch als Entwicklungsoption in Betracht gezogen, sinkt damit der Druck, absolute Verbrauchsreduktionen bei traditionellen Verbrauchern zu erreichen. Die Notwendigkeit auch Suffizienzstrategien zur Veränderungen der Nutzungsgewohnheiten umzusetzen (z.B. geringeres Mobilitätsniveau) ist daher geringer.

Wesentliche Folge eines stark steigenden Stromverbrauchs ist die Notwendigkeit eines sehr starken Ausbaus von EE-Kapazitäten mit den damit verbundenen Ressourcen- und Flächenbedarfen.

#### *Moderat steigender Stromverbrauch*

Innerhalb eines Entwicklungsszenario, in dem der Gesamtstromverbrauch nur moderat über das derzeitige Niveau steigt (bis ca. 650 TWh im Jahr 2050), können Sektorkopplungsstrategien nur in einem begrenzteren Maße umgesetzt werden, es müssen starke Fortschritte in der Energieeffizienz erreicht werden und der Einsatz ineffizienter Stromanwendung (z.B. PtL) muss geringer sein.

Im Verkehrssektor wird in entsprechenden Szenarien davon ausgegangen, dass zwar der Individualverkehr weitreichend durch direkt-elektrisch angetriebene Fahrzeuge oder durch in Deutschland erzeugte strombasierte Kraftstoffe abgedeckt werden kann. Jedoch können mit einem moderaten Stromverbrauchsanstieg nicht ausreichend strombasierte Kraftstoffe in Deutschland hergestellt werden um auch andere Verkehrssektoren wie den Schwerlastverkehr zu dekarbonisieren. Um einen sehr starken Strombedarf im Wärmesektor zu verhindern, müssten ambitioniertere, jedoch nicht unbedingt die maximalen realistisch denkbaren energetischen Sanierungen umgesetzt werden (Gerhardt & Sandau, 2015). Im Szenario *Energiesystem Deutschland 2050* (Fraunhofer ISE, 2013) sinkt z.B. der Raumwärmebedarf auf 40% des heutigen Niveaus. Die Notwendigkeit der Nutzung von nationaler und importierter Biomasse sowie von Solarthermie ist zudem ebenfalls relativ hoch. Im Verkehrssektor wird in entsprechenden Szenarien davon ausgegangen, dass zwar der Individualverkehr weitreichend durch direkt-elektrisch angetriebene Fahrzeuge oder durch in Deutschland erzeugte strombasierte Kraftstoffe abgedeckt werden kann. Jedoch können mit einem moderaten Stromverbrauchsanstieg nicht ausreichend strombasierte Kraftstoffe in Deutschland hergestellt werden, um auch andere Verkehrssektoren wie den Schwerlastverkehr zu dekarbonisieren. Um einen sehr starken Strombedarf im Wärmesektor zu verhindern, müssten ambitioniertere, jedoch nicht unbedingt die maximalen realistisch denkbaren energetischen Sanierungen umgesetzt werden (Gerhardt & Sandau, 2015). Im Szenario *Energiesystem Deutschland 2050* (Fraunhofer ISE, 2013) sinkt z.B. der Raumwärmebedarf auf 40% des heutigen Niveaus. Die Notwendigkeit der Nutzung von nationaler und importierter Biomasse sowie von Solarthermie ist zudem ebenfalls relativ hoch.

Um einen Anstieg der Stromerzeugung zu verringern, kann auch der Import von Strom gesteigert werden. Im KSZ 80 werden beispielsweise 61 TWh importiert (u.a. durch Anbindung norwegischer (Pump-)Speicherkraftwerke über zusätzliche Seekabel). Bei einer starken Umsetzung der beschriebenen Entwicklungsoptionen sinkt die Notwendigkeit, Stromverbrauchssteigerungen durch starke Suffizienzstrategien zu verhindern.

#### *Gleichbleibender oder sinkender Stromverbrauch*

Ein Entwicklungsszenario, in dem der Gesamtstromverbrauch nicht über das derzeitige Niveau von 550 TWh hinaus steigt oder sogar darunter absinkt, hat weitreichende Konsequenzen für die Entwicklung der Energieeffizienz sowie für die Dekarbonisierungsstrategien im Verkehrs- und Wärmesektor. Es wäre nicht möglich, dass wesentliche neue Verbraucher zu den traditionellen Verbrauchern hinzukämen. Somit kann in einem solchen Szenario im Verkehrssektor nicht durch eine starke direkte Elektrifizierung von Pkw und (Oberleitungs-)Lkw und noch weniger durch in Deutschland produzierten strombasierten Kraftstoffen die erforderlichen Emissionsminderungen erreicht werden. Ebenfalls kann im Wärmesektor keine starke Verbreitung von Wärmepumpen erfolgen oder fossile Brennstoffe durch in Deutschland produzierte strombasierte synthetische Energieträger (insb. Wasserstoff) im großen Maßstab substituiert werden.

Insgesamt müssen zu einer Erreichung der Klimaschutzziele ohne einen Anstieg des Stromverbrauchs relativ hohe Nutzungsgrade von nicht-strombasierten erneuerbaren Energien wie Biomasse und Solarthermie erreicht werden und die entsprechenden Potentiale erschlossen werden. Alternativ oder ergänzend hierzu könnte der Anteil der direkten oder indirekten (über strombasierte Gase und Kraftstoffe) Stromimporte stark gesteigert werden. Dies würde jedoch die Abhängigkeit vom Ausland im Energiesektor im Vergleich zu anderen Ausgestaltungsoptionen stark steigern.

Um eine Steigerung des Stromverbrauchs aufgrund des fortlaufenden Wirtschaftswachstums zu verhindern oder sogar eine absolute Reduktion des Stromverbrauchs zu erreichen, müssen zudem hohe Effizienzgewinne in Industrie, Gewerbe und Haushalten erreicht werden, welche sich jedoch nicht wesentlich von Szenarien mit höheren Stromverbräuchen unterscheiden. Hierzu sind in jedem Fall weitreichende Politikmaßnahmen notwendig (z.B. Steigerung der Energiepreise für Verbraucher durch Abgaben und Steuern). Ebenso sind Suffizienzstrategien notwendig, um über technische Effizienzmaßnahmen hinaus durch Verhaltensänderungen zusätzliche Einspareffekte (z.B. Reduktion des motorisierten Individualverkehrs durch eine Förderung des öffentlichen Verkehrs, des Fußgehens und des Radfahrens) zu erzielen.

Relevante Szenarien für eine solche Option sind das Zielszenario der Energiereferenzprognose des BMWi (Schlesinger et al., 2014a) oder „Der Plan“ von Greenpeace (Greenpeace, 2015).

## **Gegenüberstellung der Ausgestaltungsmöglichkeiten**

Die Darstellung der verschiedenen Entwicklungsmöglichkeiten des Stromverbrauchs zeigen, dass das Ziel einer Begrenzung des Stromverbrauchs weitreichende Konsequenzen für die Entwicklung der Transformation des Energiesystems hat. Da der Stromverbrauch an sich jedoch keine Steuerungsgröße ist, ist er eher als Ergebnis anderer Transformationsstrategien zu betrachten.

Wesentlich bei der Analyse der verschiedenen Entwicklungsmöglichkeiten ist, dass in Szenarien mit einem stark steigenden Stromverbrauch der Spielraum für Transformationsstrategien im Verkehrs- und Wärmesektor deutlich größer ist. Bei einem gleich bleibenden Stromverbrauch auf heutigem Niveau sind die Nutzung von erneuerbarem Strom für strombasierte Kraftstoffe und eine starke Verbreitung von Wärmepumpen und PtH-Anwendungen als Transformationsstrategien nicht möglich. Zudem verringert sich der Bedarf an der Umsetzung von verhaltensbezogenen Suffizienz-Strategien in Szenarien mit einem stark steigenden Stromverbrauch. Auch wenn es paradox erscheint, so beinhalten anspruchsvollere Ziel-Szenarien einen höheren Stromverbrauch, da hier mehr fossile Energieträger durch strombasierte Energieträger und Anwendungen substituiert werden.

Wesentlicher Effekte eines steigenden Strombedarfs ist der Bedarf an sehr hohen EE-Kapazitäten um die entsprechenden EE-Anteile zu erreichen. Im ISWV-Szenario mit einem Strombedarf von 788 TWh im Jahr 2050 werden z.B. über 140 GW wind-onshore und 200 GW Photovoltaik benötigt (Gerhardt & Sandau, 2015). Auch das KS95-Szenario mit einem Strombedarf von ca. 780 TWh beinhaltet EE-Kapazitäten von über 300 GW (Öko-Institut & Fraunhofer ISI, 2015a). Dies bedeutet ungefähr eine Verdreifachung zu der derzeit installierten Leistung. Um diese hohen Kapazitäten zu erreichen, sind ein jährlicher Zubau von ca. 2,8 GW Wind-onshore und 4,5 GW Photovoltaik notwendig. Im Vergleich dazu sind im Ziel-Szenario der Energiereferenzprognose mit einem Stromverbrauch von 462 TWh im Jahr 2050 nur ein Viertel bis ein Drittel dieser Zubauraten notwendig. Zum Vergleich: Im Jahr 2017 wurde ein Zubau von 5 GW wind-onshore und 1,7 GW Photovoltaik erreicht (UBA, 2018). Direkte Konsequenz hoher EE-Kapazitäten sind ein entsprechend größerer Flächenbedarf und ein steigender Bedarf an Flexibilitätsoptionen und Netzausbau (siehe hierzu u.a. Fraunhofer ISI, 2017).

Eine Reduktion des Bedarfs an inländischer Stromerzeugung durch einen höheren Anteil von EE-Strom-Importen ist mit der Unsicherheit bzgl. EE-Ausbaus in den angrenzenden EU-Staaten und damit mit einem Risiko verbunden. Zudem stehen die anderen EU-Staaten bei gleichen Transformationszielen vor ähnlichen Herausforderungen, so dass zusätzliche EE-Strommengen nicht unbedingt einfach importiert werden können.

## **Stakeholder-Positionen**

Die Höhe des Stromverbrauchs ist keine Steuerungsgröße auf die sich einzelne Stakeholder-Gruppen beziehen. Vielmehr ist der Stromverbrauch Ergebnis anderer Richtungsentscheidungen, insbesondere im Verkehrs- und Wärmesektor. Die Stakeholder-Positionen zu diesen Richtungsentscheidungen sind den entsprechenden Kapiteln zu entnehmen (z.B. Wärmesektor und Verkehrssektor).

Lediglich der Faktor Energieeffizienz beim herkömmlichen Verbrauch kann als eigenständige Richtungsentscheidung angesehen werden. Jedoch zeigen hier die verschiedenen Klimaschutz-Szenarien, dass keine großen Differenzen in diesem Bereich angenommen werden. Alle Szenarien beinhalten wesentliche Effizienzsteigerungen, die über das 25%-Ziel der Bundesregierung hinausgehen. Somit kann festgestellt werden, dass wesentliche Anstrengungen im Bereich Energieeffizienz in den nächsten Jahrzehnten in jedem Fall notwendig sind.

### 3.1.2. Erneuerbare Energien

#### *Hoher vs. geringer Anteil erneuerbarer Energien im Stromsektor*

Das Erreichen der energiepolitischen Ziele einer Reduktion der Treibhausgasemissionen hängt neben anderen Faktoren stark von der Form der Energieversorgung ab. Ein hoher Anteil erneuerbarer Energien an der Stromversorgung begünstigt das Erreichen dieses Ziels. Ausschlaggebend dafür, wie hoch der Anteil erneuerbarer Energien an der Stromerzeugung sein muss, ist das angestrebte Emissionsreduktionsniveau. Dem Stromsektor kommt dabei eine wichtige Rolle zu, da in diesem Sektor leichter Emissionen eingespart werden können als in anderen Sektoren. Wie groß jedoch die Fähigkeit dieses Sektors zur Aufnahme erneuerbarer Energien ist, hängt beispielsweise von einem ausreichenden Netzausbau oder Flexibilisierung des Stromverbrauchs ab. Sind diese Voraussetzungen nicht erfüllt, kann nur bedingt ein Ausbau erneuerbarer Energien erfolgen.

*Tabelle 2: Übersicht über die Emissionsreduktionsziele und dafür notwendige Anteile erneuerbarer Erzeugung im Stromsektor (Quelle: Eigene Darstellung)*

Möglichkeit	Beschreibung	Pro	Contra
80% Emissionsreduktion (Untergrenze laut Energiekonzept)	<ul style="list-style-type: none"> <li>· Eine 80% Reduktion der Treibhausgasemissionen über alle Sektoren.</li> <li>· EE-Anteil an der Stromerzeugung: 73 – 82%</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>· Ein Ziel, das die geringste Anpassung des bisherigen Systems voraussetzt.</li> <li>· Bestehende Infrastruktur (Bspw. Gas-kraftwerke) kann ggf. weiter verwendet werden.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>· Die Paris-Ziele können nicht erreicht werden.</li> </ul>
95% Emissionsreduktion (Obergrenze laut Energiekonzept)	<ul style="list-style-type: none"> <li>· Eine 95% Reduktion der Treibhausgasemissionen über alle Sektoren.</li> <li>· EE-Anteil an der Stromerzeugung: 83 – 94%</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>· Der Stromsektor kann durch Sektorkopplung Emissionen in anderen Sektoren vermeiden.</li> <li>· Die Paris-Ziele könnten unter bestimmten Bedingungen erreicht werden.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>· Erhöhte Kosten durch Investitionen in erneuerbare Energien an weniger optimalen Standorten und notwendige Infrastruktur (Flexibilitäten)</li> </ul>
100% Emissionsreduktion	<ul style="list-style-type: none"> <li>· Eine vollständige Reduktion der gesamten Emissionen.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>· Der Stromsektor kann Emissionen auch für andere Sekto-</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>· Kosten für die vollständige Emissionsreduktion steigen ggf.</li> </ul>

- EE-Anteil: 100%
- Die Paris-Ziele können erreicht werden.
- Erhöhte Akzeptanzprobleme möglich bei einem großflächigen Ausbau erneuerbarer Energien

---

### Unsicherheiten und externe Treiber

---

- Unklar, ob notwendige Infrastrukturprojekte, wie Netzausbau, zeitgerecht umgesetzt werden.
- Kostenentwicklungen notwendiger Technologien sind nur schwer absehbar.
- Notwendige Potenziale möglicherweise schwer zu erschließen.

---

### Wechselwirkungen mit anderen Richtungsentscheidungen

---

- Konventionelles Erdgas vs. Gasnetz als Langzeitspeicher
  - Netzausbau vs. alternative Optionen (incl. Flexibilität)
  - Verstärkt Effizienz/Dämmen vs. verstärkt erneuerbare Energien
  - Sektorkopplung Elektrifizierung vs. synthetische Brennstoffe
  - Bioenergie im Stromsektor vs. Wärmesektor vs. Verkehrssektor
  - PV vs. windlastige Struktur der erneuerbaren Erzeugung
- 

### Fragestellung/Problemaufriss

Die im Energiekonzept der Bundesregierung (Deutsche Bundesregierung, 2010) festgelegten Ziele für eine Emissionsreduktion liegen zwischen 80 und 95% des Emissionsniveaus des Jahres 1990. Verschiedene Studien ((Nitsch et al., 2011), (Schlesinger et al., 2014a), (Repenning et al., 2015a), (Bernath et al., 2017b)) haben den jeweils notwendigen Anteil erneuerbarer Energien für unterschiedliche Emissionsreduktionsniveaus untersucht. In der folgenden Abbildung findet sich eine Übersicht darüber, welche Menge an erneuerbarer Erzeugung aus diesen Zielen resultiert.

Vom gewählten Anteil erneuerbarer Energien ist abhängig, welche technologische Ausgestaltung des Systems dafür jeweils notwendig ist. Obwohl der Anteil erneuerbarer Energien des Minimal- und Maximalziels nah beieinander liegt, müssen besonders hohe Anstrengungen unternommen werden, um hohe Reduktionsziele zu erreichen.

Das minimale Emissionsreduktionsziel von 80% Treibhausgasemissionen gegenüber 1990 stellt die unter den heutigen Bedingungen, kosteneffiziente Option dar (Fraunhofer ISI et al., 2017). Der Grund hierfür ist, dass ein System, das dieses Ziel erreicht, die größte Ähnlichkeit zum Status Quo aufweist. Verändern sich jedoch die Rahmenbedingungen, das heißt steigen beispielsweise Primärenergieträgerpreise an und sinken Investitionskosten von Speichertechnologien, so verändern sich auch die von einem System verursachten Kosten. Es ist daher nicht klar, ob die weniger ambitionierte Reduktion von Emissionen auch die kostengünstigste Alternative sein wird.

### Beschreibung der Ausgestaltungsmöglichkeiten

#### *80% Emissionsreduktion*

Ein 80% Emissionsreduktionsszenario zeichnet sich durch einen höheren Anteil fossiler Technologien aus als andere Szenarien. Die bedarfsgerechte Erzeugung konventioneller Technologien wird teilweise fortgeführt und kann so einen Ausgleich von Erzeugung und Verbrauch unterstützen. Im Bereich der Flexibilitäten werden leicht zu erschließende Optionen Einsatz finden. Dazu zählen Lastmanagement in Haushalten, Gewerbe und Industrie einerseits, aber auch neue Verbraucher, wie Elektromobilität und Wärmepumpen auf der anderen Seite. Einen Bedarf für die Verwendung von Langzeitspeichertechnologien gibt es in 80% Szenarien noch kaum (Fraunhofer ISI et al., 2017; Öko-Institut & Fraunhofer ISI, 2015a).

Der Grund dafür ist, dass Erzeugungsdefizite besonders durch konventionelle Technologien, kurzzeitige Flexibilitäten oder das Stromnetz ausgeglichen werden können. Obwohl eine 80%ige Reduktion der Treibhausgasemissionen die offiziellen nationalen Ziele erreicht, werden internationale Ziele, die im Rahmen des Paris Agreements (UNFCCC, 2015) formuliert wurden, nicht erreicht, wenn die sich daraus ergebenden Emissionsbudgets auf Deutschland runtergebrochen werden.

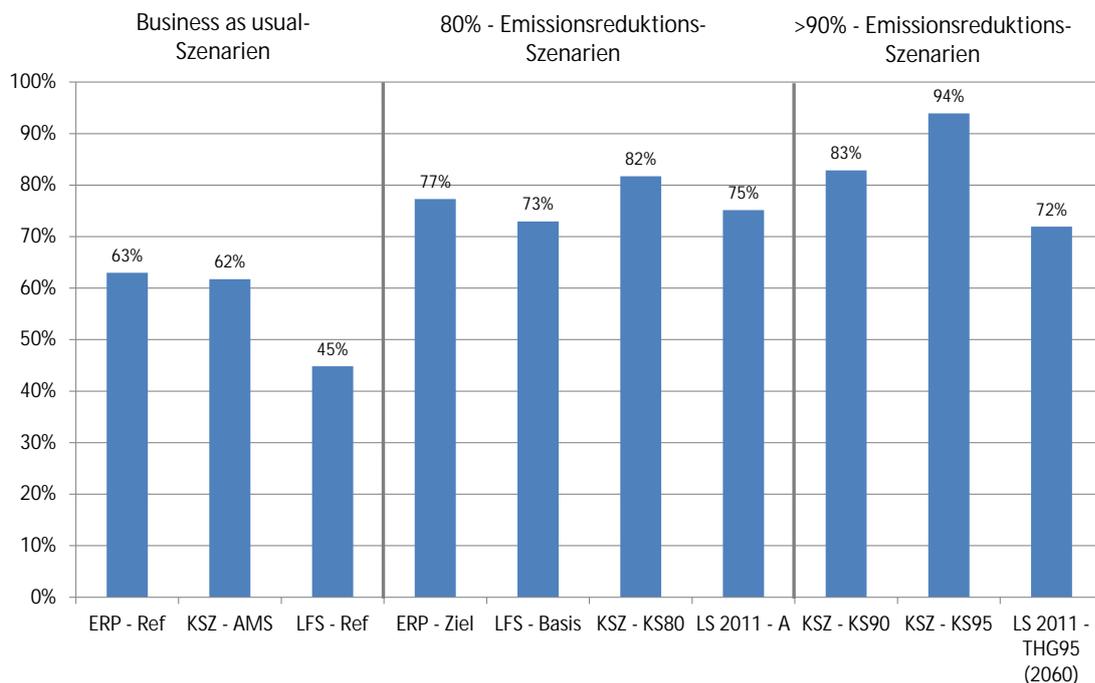


Abbildung 5: Anteile erneuerbarer Energien an der Stromerzeugung in unterschiedlichen Studien (Quelle: Eigene Darstellung. Basierend auf (Nitsch et al., 2011), (Schlesinger et al., 2014a), (Repenning et al., 2015a), (Bernath et al., 2017b))

### 95% Emissionsreduktion

Eine ambitionierte Reduktion von Treibhausgasen wie das im Energiekonzept formulierte obere Reduktionsziel für Emissionen (minus 95 % ggü. 1990) setzt neben einem erhöhten Einsatz von erneuerbaren Energien im Stromsektor auch eine erhöhte Reduktion von Emissionen in anderen Sektoren voraus. Die dafür benötigte Energie stammt zum großen Teil ebenfalls aus dem emissionsfreien Stromsektor (Greiner & Hermann, 2016). Mit sehr hohen EE-Kapazitäten wird es so zunehmend notwendig, Anlagen an Standorten zu bauen, die keine optimalen Bedingungen für eine Stromerzeugung aus erneuerbaren Energien aufweisen. Bei besonders hohen Anteilen kann es so notwendig werden, praktisch alle möglichen Standorte auszunutzen (RLI & BEE, 2013).

Neben der technologischen Herausforderung könnte es ebenso im Bereich der Akzeptanz zu verstärkten Problemen kommen, da durch einen erhöhten Ausbau erneuerbarer Erzeugungsanlagen eine größere Zahl an Bürgern in direkten Kontakt mit Windrädern und PV-Anlagen kommen wird. Regionale Opposition zu solchen Projekten wird so immer häufiger auftreten, was die Umsetzung erschwert bzw. zu erhöhten Projektkosten durch Beteiligungsprozesse etc. führen kann.

Herausforderungen, die bereits bei einer 80%igen Versorgung mit erneuerbaren Energien auftreten, wie das Auseinanderfallen von Last und Erzeugung, nehmen bei einem weiteren Ausbau überproportional zu. Zur Gewährleistung der Stromversorgung in Zeiten, in denen eine Erzeugung von Strom aus erneuerbaren Energiequellen an seine Grenzen gerät, stehen klassische fossile Technologien kaum noch zur Verfügung. Um dieses Problem zu lösen, rückt einerseits die Rolle des Imports und Exports von Strom und andererseits die Bereitstellung von synthetischen Energieträgern auf der Basis erneuerbarer Energien in den Vordergrund.

### 100% Emissionsreduktion

Eine vollständige Reduktion der Emissionen bringt die größten Anforderungen an das Gesamtsystem mit sich. Neben einer Reduktion der Emissionen des Stromsektors wird in den anderen Sektoren eine

vollständige Emissionsreduktion notwendig. Diese kann durch die Kopplung der Sektoren erreicht werden. Die Umsetzung eines solchen Ziels ist mit einem großen Aufwand verbunden, allerdings sind zukünftige technologische Entwicklungen und die daraus sich ergebenden Umsetzungsoptionen nur schwer absehbar. (Fraunhofer ISE, 2012) schreibt zu einem 100% EE System: *„Eine Energieversorgung Deutschlands für Strom und Wärme ist mit 100% erneuerbaren Energien möglich, [...]“* Die in Deutschland vorhandenen Potenziale reichen für einen Ausbau erneuerbarer Energien aus. Nichtsdestotrotz werden technologische Entwicklungen von bspw. erneuerbaren und Speichertechnologien nicht ausbleiben und notwendig sein um dieses Ziel zu erreichen.

## **Gegenüberstellung der Ausgestaltungsmöglichkeiten**

Besonders bei einem System, das zu 100% durch erneuerbare Energien versorgt wird, stellt sich die Frage der Kosten. Neben notwendigen Investitionen in erneuerbare Anlagen entstehen ebenso Kosten durch den Bau und Betrieb von Speichern. Ein Vergleich mit dem heutigen System zeigt, das besonders bei steigenden CO<sub>2</sub>- und Gaspreisen ein erneuerbares System im Jahr 2050 gleich viel oder weniger kostet (Öko-Institut, 2017).

Bei hohen Anteilen erneuerbarer Energien gewinnt die Frage der Versorgungssicherheit an Relevanz. Mit einem sinkenden Anteil bedarfsgerechter konventioneller Erzeugung müssen Maßnahmen erfolgen, die eine unterbrechungsfreie Versorgung garantieren. In Systemen mit einem Restanteil konventioneller Erzeugung kann dies durch fossile Kraftwerke erfolgen. In einem vollständig erneuerbaren System wird es allerdings notwendig werden, dass Gaskraftwerke zur Gewährleistung der Versorgungssicherheit durch erneuerbare Energieträger versorgt werden (Öko-Institut, 2016).

## **Stakeholderpositionen**

Im öffentlichen Diskurs gibt es unterschiedliche Stimmen, die sich zur Struktur der zukünftigen Energieversorgung äußern. Diese sind grob in zwei Gruppen zu unterteilen: Einerseits Akteure, die sich für eine ambitionierte Gestaltung der zukünftigen Versorgung aussprechen und eine 100%ige Versorgung mit erneuerbaren Energien befürworten. Auf der anderen Seite stehen jene Akteure, die Bedenken im Bereich der Versorgungssicherheit nennen und die nach wie vor wichtige Rolle von konventionellen Technologien betonen.

Bei den Parteien streben (Die Grünen, 2017) eine vollständige erneuerbare Versorgung an: *„Für uns ist das Ziel erst erreicht, wenn Deutschland zu 100 Prozent mit erneuerbaren Energien versorgt wird[...]“*. Auch der Bundesverband erneuerbarer Energien äußerte sich entsprechend. 100% erneuerbare Energien stellen demnach die Grundlage für eine *„international wettbewerbsfähige Gesellschaft“* (BEE, 2017a) dar. Dem schließt sich auch (Greenpeace, 2017) an: Das Energieszenario „Der Plan“ zeigt einen möglichen Weg für den kompletten Ausstieg aus der fossilen Energienutzung auf. Bis zur Mitte des Jahrhunderts sei ein solcher Ausstieg möglich und eine 100%ige erneuerbare Versorgung realistisch.

Im Bereich der Wissenschaft wurden die Möglichkeiten einer vollständigen Versorgung mit erneuerbaren Energien betrachtet. So kommt das Umweltbundesamt in einer entsprechenden Untersuchung zu folgendem Schluss: *„Eine vollständig auf erneuerbaren Energien beruhende Stromerzeugung im Jahr 2050 ist in Deutschland als hoch entwickeltes mit heutigem Lebensstil, Konsum und Verhaltensmuster technisch möglich.“* (UBA, 2010). Zu diesem Schluss kommt auch SRU, 2011: *„100 % Vollversorgung mit Strom aus erneuerbaren Energien ist möglich, sicher und bezahlbar“* oder die (Enquete-Kommission, 2002).

Andere Stimmen äußern sich kritischer zu der Umsetzung einer 100%igen Versorgung mit erneuerbaren Energien. Hier werden besonders Bedenken der Versorgungssicherheit vorgebracht. Der (Gesellschaft Energietechnik, 2011) fordert vor dem Hintergrund der Abschaltung emissionsintensiver Kraftwerke u.a. beschleunigte Genehmigungsverfahren für neue Kraftwerke, um eine Gefährdung der Versorgungssicherheit auszuschließen. Auch werden ein langsamerer Ausstieg aus fossilen Erzeugern (siehe das Kapitel Kurzfristiger vs. später Ausstieg aus der Kohlestromerzeugung) und somit eine „kontrolliertere“ Energiewende auf parteipolitischer Ebene angemahnt (FDP). Stromerzeugung aus konventionellen und synthetischen Erdgas (DEBRIV, 2016) und Braunkohle (DEBRIV, 2016) wird von einigen Akteuren als unverzichtbare Energiequelle in einem zukünftigen Energiesystem gesehen. Die Verwendung dieser fossilen Energieträger schließt allerdings die Umsetzung eines vollständig erneuerbaren Energiesystems aus.

## PV vs. windlastige Struktur der erneuerbaren Erzeugung

Neben der Frage, wie groß der Anteil der erneuerbaren Energien im Jahr 2050 an der Stromerzeugung insgesamt sein wird, stellt sich ebenso die Frage, wie groß die Anteile der verschiedenen EE-Technologien am Erzeugungsmix sein werden. Im Zentrum dieser Frage steht die installierte Leistung von Wind- und Photovoltaik, da andere Technologien wie Biomasse oder Wasserkraft nur ein begrenztes Potenzial aufweisen.

In der folgenden Tabelle sind die unterschiedlichen Ausgestaltungsmöglichkeiten dieser Richtungsentscheidung zu sehen.

Tabelle 3: Übersicht der Ausgestaltungsmöglichkeiten der Struktur der erneuerbaren Erzeugung (Quelle: Eigene Darstellung)

Möglichkeit	Beschreibung	Pro	Contra
Viel Wind	<ul style="list-style-type: none"> <li>Ein Großteil der erneuerbaren Stromerzeugung erfolgt durch Windkraftwerke</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Hohe Potenziale,</li> <li>Reduktion durchschnittlicher Stromgestehungskosten</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Konzentration der Erzeugung im ertragreichen Norden Deutschlands, Netzausbau wird unerlässlich.</li> <li>Begrenzte Flächenverfügbarkeit</li> <li>Akzeptanzprobleme möglich</li> </ul>
Offshore	<ul style="list-style-type: none"> <li>Offshore Windanlagen werden besonders stark ausgebaut.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Wenig Akzeptanzprobleme</li> <li>Geringerer Flexibilitätsbedarf</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Hohe Investitionskosten in Netz und Anlagen</li> <li>Lange Umsetzungsdauer</li> </ul>
Viel PV	<ul style="list-style-type: none"> <li>Ein Großteil der erneuerbaren Stromerzeugung erfolgt durch Photovoltaikanlagen</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Geringe Akzeptanzprobleme</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Höhere Erzeugungskosten</li> <li>Begrenzte Flächenverfügbarkeit</li> </ul>
Ausgeglichen	<ul style="list-style-type: none"> <li>Die Erzeugung erneuerbaren Stroms wird auf verschiedene Energieträger aufgeteilt.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Unterschiedliche Erzeugungsprofile können sich gegenseitig ergänzen</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Höhere gesamte Kapazitäten notwendig um Strombedarf zu decken</li> </ul>

### Unsicherheiten und externe Treiber

- Ausgestaltung des EE-Fördermechanismus

### Wechselwirkungen mit anderen Richtungsentscheidungen

- Flexibilitätsbedarf und ausgeglichener vs. fokussierter Flexibilitätenmix
- Netzausbau vs. alternative Optionen (incl. Flexibilität)

### Fragestellung/Problemaufriss

Aus den unterschiedlichen Technologieanteilen folgen unterschiedliche Ausgestaltungen in der Praxis. Eine Diskussion zur regionalen Verteilung, die mit der Struktur der erneuerbaren Erzeugung eng ver-

bunden ist, findet sich im nachfolgenden Kapitel. Aber auch darüber hinaus folgen aus dem Technologiemix unterschiedliche Effekte.

Windanlagen weisen in der Regel höhere Volllaststunden auf und erzeugen so pro installiertem MW mehr Strom. So befinden sich PV-Anlagen durchschnittlich in der Größenordnung von 1000 Volllaststunden und Windenergieanlagen durchschnittlich im Bereich von 1500 Stunden (AEE, 2013) Daraus folgt, dass bei einer Fokussierung auf PV eine höhere Leistung installiert werden muss, um die gleiche Strommenge erzeugen. Eine Anwendung von PV-Anlagen kann allerdings dort erfolgen, wo eine Nutzung von Windanlagen nicht möglich ist. Dies ist besonders in Städten der Fall.

## Beschreibung der Ausgestaltungsmöglichkeiten

In der folgenden Abbildung sind die installierten Leistungen verschiedener Szenarien nebeneinander dargestellt. Es ist zu erkennen, dass in den unterschiedlichen Studien, unabhängig vom Gesamtanteil erneuerbarer Energien, der größte Anteil erneuerbarer Erzeugung durch Wind und Photovoltaik bereitgestellt wird. Biomasse und offshore Windenergie nehmen nur einen kleinen Anteil der installierten Leistung ein.

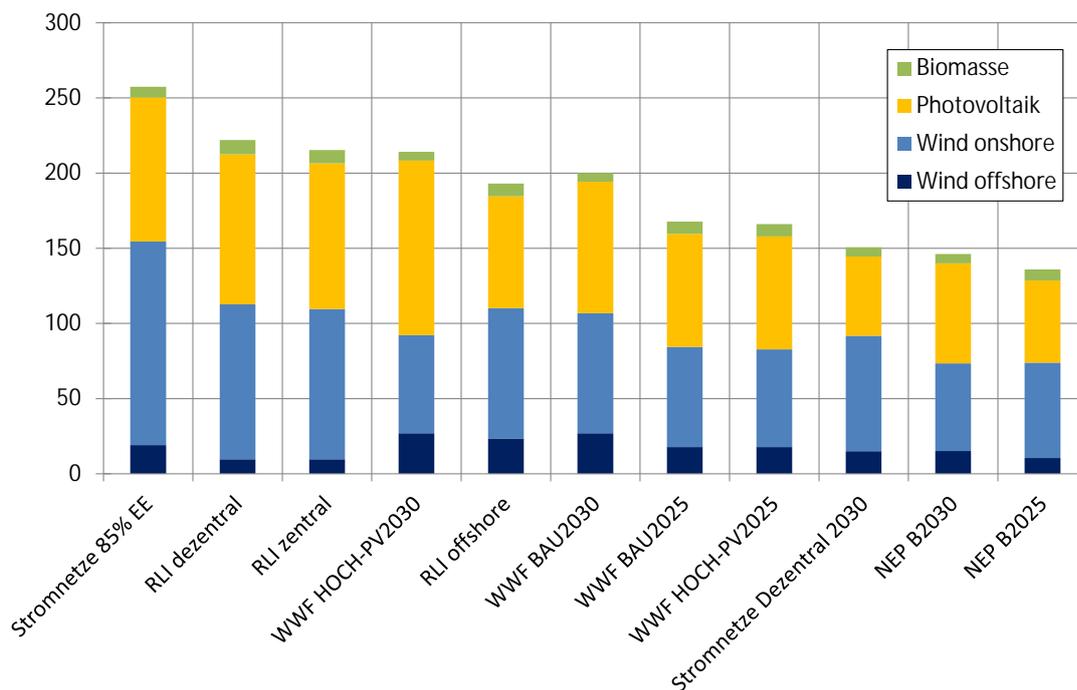


Abbildung 6: Vergleich der installierten erneuerbaren Leistung verschiedener Studien in 2030 (Quelle: Eigene Darstellung basierend auf: (50 Hertz et al., 2017; Matthes et al., 2018; RLI & BEE, 2013; Timpe et al., 2018).)

Eine vergleichbare Übersicht ist in Abbildung 7 zu sehen, die die Stromerzeugung im Jahr 2050 in Strommengen darstellt. Besonders hohe Leistungen an Windkraft und Fotovoltaik sind in den verschiedenen Szenarien zu sehen.

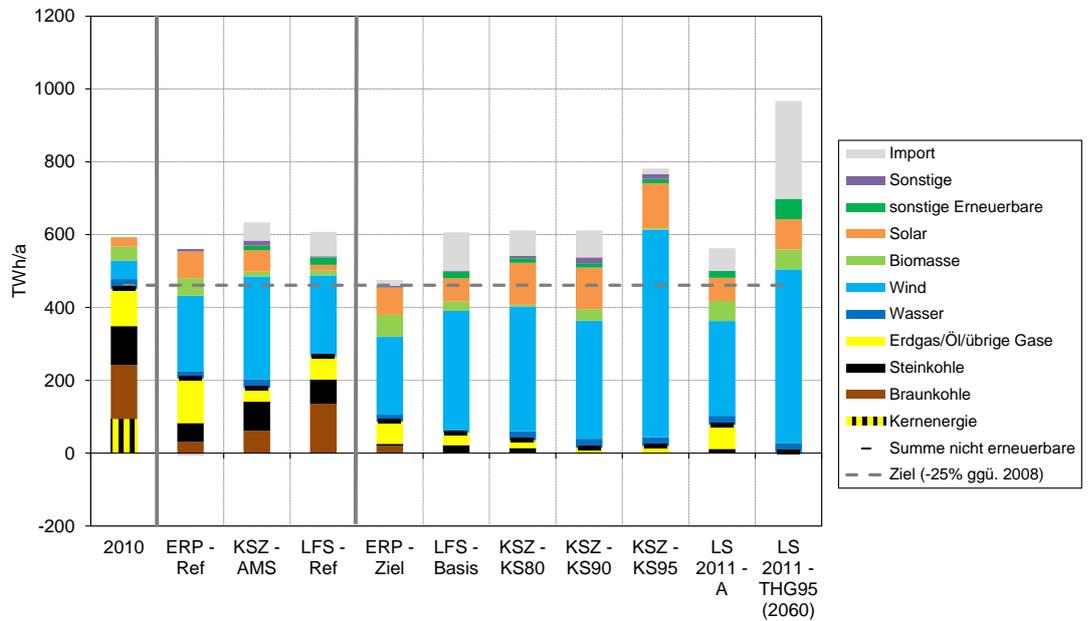


Abbildung 7: Übersicht der Stromerzeugung verschiedener Studien im Jahr 2050 in TWh/a (Quelle: Eigene Darstellung basierend auf (BMU, 2010; Fraunhofer ISI et al., 2017; Öko-Institut & Fraunhofer ISI, 2015a; Schlesinger et al., 2014a)

Mehr Stromerzeugung durch Windanlagen kann zu mehr Akzeptanzproblemen führen. Dies hängt besonders damit zusammen, dass es zu mehr Kontakt zwischen Bevölkerung und Infrastrukturprojekten kommt (C.A.R.M.E.N., 2014). Die Akzeptanz von Projekten hängt von unterschiedlichen Faktoren ab, so beispielsweise der Beteiligung und Form der Umsetzung. Werden bestimmte Bedingungen nicht berücksichtigt, kann dies zu einem Gefühl der Verfremdung führen und erneuerbare Projekte blockieren (Hildebrand et al., 2012). Photovoltaikprojekte verursachen in der Regel geringere Akzeptanzprobleme, da diese die Umwelt nur im geringen Maße beeinflussen.

Auch in Hinblick auf die Erzeugungszeitreihen der beiden Technologien gibt es Unterschiede. Besonders der Anteil von PV am Erneuerbaren-Mix hat einen hohen Einfluss auf die Anforderungen an Flexibilitäten. Je höher der Anteil an Photovoltaik, desto steiler sind die Gradienten der Erzeugung, die durch andere Anlagen ausgeglichen werden müssen. Erzeugung von Windenergieanlagen weist geringere Gradienten auf (Huber et al., 2014).

Ein zu starker Fokus auf eine Technologie kann auch dazu führen, dass ein System anfällig gegen einen Erzeugungsausfall einer Technologiegruppe wird. Flauten wirken sich so besonders stark auf Systeme mit einem hohen Windanteil aus, wohingegen bewölkte Tage in einem von PV dominierten System zu einem Erzeugungsdefizit führen können. Dies spricht für einen ausgeglichenen Erzeugungsmix, in dem sich die verschiedenen Erzeugungsprofile ergänzen können. Ein solcher Erzeugungsmix kann höhere Kosten aufweisen, als ein auf eine Maximierung der Erzeugung ausgerichteter Kraftwerkspark, da effiziente Kraftwerke durch weniger effiziente Kraftwerke ersetzt werden, um eine Diversifizierung der Erzeugung zu erreichen. Dadurch stehen diese Kosten dem Nutzen einer ausgeglicheneren Erzeugungskurve gegenüber.

Neben Abweichungen in Hinblick auf die Erzeugung ist ebenso zu berücksichtigen, dass je nach verwendeter Technologie Ressourcenprobleme auftreten können. Besonders im Bereich der Photovoltaik-Technologien wird eine Zahl an kritischen Materialien verwendet, die nur in begrenzter Menge vorliegen (Indium, Tellurium, Gallium). Sinkt die Verfügbarkeit dieser Ressourcen, ist gegebenenfalls eine Technologiesubstitution in Erwägung zu ziehen. In Windturbinen werden derzeit zwar ebenso seltene Erden (Neodym in permanenten Magneten) verwendet, hier können jedoch kritische Entwicklungen durch Substitution oder Recycling umgangen werden (WWF & Ecofys, 2014).

Stromerzeugung durch Offshore-Windenergieanlagen kann heute nur bedingt als vorrangige Technologie genutzt werden und ist derzeit als Ergänzung des Erzeugungsmixes zu sehen. Dies hängt unter anderem mit den heutigen hohen Investitionskosten zusammen. Zukünftig führt eine große Leistung in diesem Bereich in jedem Fall zu einem erhöhten Netzausbaubedarf, da Standorte dieser Technologie konzentriert in der Nord- und Ostsee vorliegen (RLI & BEE, 2013). Im Unterschied zu Onshore-

Windenergieanlagen weisen Offshore-Anlagen eine noch höhere Zahl an Volllaststunden auf und können so höhere Energiemengen mit derselben installierten Leistung erzeugen.

## **Stakeholderpositionen**

Zum optimalen Erzeugungsmix gibt es verschiedene Vorstellungen. So beschreibt (Burger, 2017) ein ausgeglichenes Verhältnis von Wind und PV mit dem Ziel, Zeiten von Überschusserzeugung zu minimieren. Die installierten Leistungen der beiden Technologien bewegen sich in einem solchen Szenario in einer vergleichbaren Größenordnung. (Agora Energiewende et al., 2013) schlagen einen kostenoptimalen Ausbau erneuerbarer Energien vor. Dieser ist besonders durch einen Ausbau von Wind charakterisiert.

(Hirschl et al., 2016) haben in verschiedenen Projekten den unterschiedliche Effekte eines Ausbaus von Photovoltaikanlagen beschrieben. Positive Effekte durch Eigenverbrauch können dazu führen, dass es auf der Ebene von Haushalten zu einem gesteigerten Ausbau von Photovoltaik kommen kann. So beschreiben beispielsweise (Henning & Palzer, 2013) ein Stromsystem im Jahr 2050, das sich durch hohe Photovoltaianteile auszeichnet. Heutige Entwicklungen im Bereich der Prosumer, machen eine solche Entwicklung denkbar.

Eine stärkere Rolle von offshore Wind betont (Fraunhofer IWES, 2013). Die optimale Leistung von offshore Windanlagen liegt demnach im Bereich von 50 GW für ein auf Wind konzentriertes Szenario. Diese Leistung ist um einiges höher als in anderen Studien: So liegt die Offshore-Leistung in einem Offshore-Szenario des (RLI & BEE, 2013) im Bereich von 30 GW. (Moshövel et al., 2015) betonen darüber hinaus die positiven Effekte, die PV-Anlagen und Speicher haben können.

## Zentrale vs. dezentrale Verteilung erneuerbarer Energien

### Fragestellung/Problemaufriss

Neben dem Anteil der erneuerbaren Energien an der Stromerzeugung und dem Technologiemarkt ist ebenso die Frage nach der regionalen Verteilung der Anlagen zu beantworten. Die Standortwahl von erneuerbaren Energien kann unterschiedlich umgesetzt werden: Zentral oder dezentral. Die unterschiedlichen Ausgestaltungsmöglichkeiten haben Auswirkungen auf andere Charakteristika des Gesamtsystems. Dazu zählen der notwendige Netzausbau oder die insgesamt notwendige Kapazität. Die möglichen Ausprägungen zentral und dezentral stellen Extrema der Verteilungsfrage dar. So kann die Verteilung auch durch eine Mischform zwischen zentraler und dezentraler Anordnung erfolgen. Um die Betrachtung der Verteilungsfrage zu erleichtern, werden hier die genannten Extrema gegenübergestellt. Eine Zusammenfassung ist in der folgenden Tabelle zu sehen.

*Tabelle 4: Übersicht über mögliche Verteilungsformen erneuerbarer Energien. (Quelle: Eigene Darstellung)*

	Beschreibung	Pro	Contra
Zentrale Verteilung	<ul style="list-style-type: none"> <li>Erneuerbare Energien werden anhand des größtmöglichen Primärenergie-Potenzials/der Standortqualität verteilt.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Minimierung notwendiger Kapazität</li> <li>Kosteneffiziente Lösung</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Erhöhter Netzausbaubedarf bzw.</li> <li>höhere Zahl an Abregelungen</li> <li>Geringe regionale Ausgleichseffekte</li> </ul>
Dezentrale Verteilung	<ul style="list-style-type: none"> <li>Erneuerbare Energien werden anhand der Nachfrage lastnah verteilt.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Geringerer Netzausbaubedarf</li> <li>Erhöhte kommunale Wertschöpfung</li> <li>Bessere Partizipationsmöglichkeiten durch weit verteilte erneuerbare Energien</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Erhöhte notwendige Gesamtkapazität</li> <li>Mögliche höhere Akzeptanzprobleme</li> </ul>

### Unsicherheit und externe Treiber

- Ausgestaltung des EE-Fördermechanismus

### Wechselwirkungen mit anderen Richtungsentscheidungen

- Netzausbau vs. alternative Optionen (incl. Flexibilität)
- Konstanter Strombedarf vs. stark steigender Strombedarf
- Flexibilitätsbedarf und ausgeglichener vs. fokussierter Flexibilitätenmix

## **Beschreibung der Ausgestaltungsmöglichkeiten**

### *Dezentrale Verteilung*

Ein dezentraler Ausbau erneuerbarer Energien zeichnet sich durch eine verbrauchsnahe Verteilung der Erzeugungsanlagen aus. PV-Anlagen finden sich vermehrt auf Dächern und Freiflächenanlagen sind in Nähe von Verbrauchszentren installiert. Eine solche Verteilung führt allerdings zu einem erhöhten Bedarf an installierten Kapazitäten, da Anlagen nicht vorrangig an Standorten errichtet werden, an denen pro installierter Kapazität die größtmögliche Erzeugung bzw. die geringsten Erzeugungskosten erreicht werden. Andererseits können Transport- und Netzausbaubedarf bzw. die abgeregelten EE-Mengen aufgrund der räumlichen Nähe von Erzeugung und Verbrauch sinken. Eine eher ausgeglichene Verteilung der Anlagen ermöglicht auch die Nutzung von interregionalen Ausgleichseffekten. Kommt es etwa zu einem wetterbedingten Erzeugungsdefizit in einer Region, ist die Wahrscheinlichkeit größer, dass in einer anderen Region immer noch Strom aus erneuerbaren Energien erzeugt werden kann (Agora Energiewende et al., 2013).

Eine höhere Verteilung in der Fläche birgt Chancen und Risiken in Hinblick auf die Partizipation von Stakeholdern. Einerseits kann es durch den erhöhten Kontakt zwischen Bürgern und Anlagen zu Akzeptanzproblemen kommen. Andererseits kann eine breite Verteilung erneuerbarer Energien die Grundlage für erhöhte Partizipationsmöglichkeiten und Beteiligungsangebote sein. Wie stark sich Bürger an der Umsetzung dieser Projekte beteiligen, ist allerdings von der Form der Partizipationsprozesse abhängig (C.A.R.M.E.N., 2014).

Die kommunale Wertschöpfung kann durch erneuerbare Projekte gesteigert werden (Hirschl et al., 2010). Wertschöpfung kann einerseits Einkünfte in Form von Steuern oder Abgaben erzeugen, die durch das Errichten und den Betrieb einer erneuerbaren Anlage anfallen. Andererseits kann es zu einem gesteigerten Bedarf an Arbeitskräften im Bereich des Baus und der Wartung erneuerbarer Energien Anlagen kommen. Im Rahmen einer breiteren Verteilung erneuerbarer Energien werden diese Einkünfte gleichmäßiger auf Kommunen und gegebenenfalls gerechter verteilt. Eine geografisch dezentrale Verteilung kann auch eine stärker dezentrale Eigentumsverteilung befördern, wenn Bürger sich finanziell am Ausbau erneuerbarer Energien in ihrer Region beteiligen.

### *Zentraler Ausbau*

Bei einem zentralen Ausbau von erneuerbaren Energien kommt es zu einem Zubau an Standorten mit besonders hohen Volllaststunden, d.h. ein Ausbau von Windkraftanlagen im Norden Deutschlands und einem Ausbau von PV-Anlagen im Süden. Da jede individuelle Anlage eine größere Menge an Strom erzeugt als an einem schlechteren Standort, sind geringere Investitionen in Erzeugungskapazitäten notwendig (Wimmer et al., 2014). Die lastferne Erzeugung zusammen mit einer hohen Gleichzeitigkeit bei der zentralen Erzeugung kann zu einem erhöhten Netzausbaubedarf führen. Durch die daraus resultierenden Erzeugungsspitzen kann es auch zu einer erhöhten Zahl an Abregelungen kommen (Agora Energiewende et al., 2013).

## **Gegenüberstellung der Ausgestaltungsmöglichkeiten**

Obwohl sich die zentrale und dezentrale Ausgestaltung zunächst als zwei Optionen gegenüberstehen, wird die Grenze zwischen diesen Verteilungsformen mit einem steigenden Anteil erneuerbarer Energien immer unschärfer. Um einen hohen Anteil erneuerbarer Energien an der Stromerzeugung zu realisieren, wird zukünftig ein Großteil der möglichen Standorte genutzt werden und die regionalen Verteilungen nähern sich folglich an (RLI & BEE, 2013). Folglich nähern sich auch die Systemkosten bei einem hohen Ausbau erneuerbarer Energien an (Agora Energiewende et al., 2013; RLI & BEE, 2013). Eine Entscheidung für einen zentralen oder dezentralen Ausbau erneuerbarer Energien wirkt sich daher in erster Linie auf die Verteilung im Übergang von konventionellem zu erneuerbarem Versorgungssystem aus.

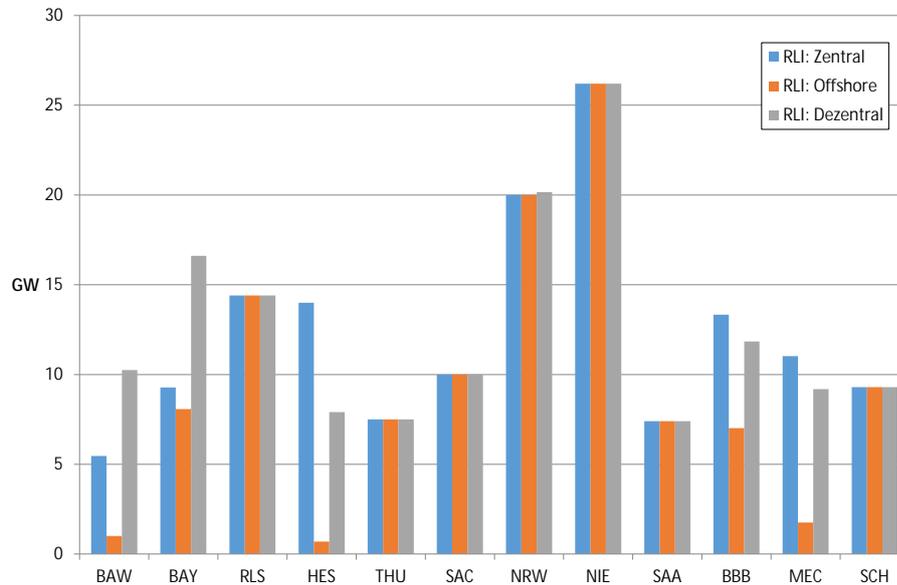


Abbildung 8: Verteilung der Wind onshore Anlagenleistung in GW in ausgewählten Szenarien für das Jahr 2040 und 100% EE (Quelle: Eigene Darstellung basierend auf (RLI & BEE, 2013))

## Stakeholderpositionen

Wie in Zukunft diese Entwicklung aussehen kann, wird von verschiedenen Stakeholdern unterschiedlich bewertet. In Bayern werden beispielsweise die Möglichkeiten eines Ausbaus der Windkraftenergie durch die herrschende 10 H-Regelung stark begrenzt (Bayrische Staatskanzlei, 2017). In Baden-Württemberg wird der Ausbau der Windenergie hingegen unter anderem mit der Anpassung des Landesplanungsgesetzes (Landtag von Baden-Württemberg) unterstützt (Ministerium für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft Baden-Württemberg, 2018). Hierbei können verschiedene Motive eine Rolle spielen: einerseits etwa die bereits genannte ökonomische Effizienz, die Bereitstellung von Strom zu möglichst niedrigen Kosten oder der Schutz des regionalen Landschaftsbilds. Andererseits die Demokratisierung der Energieversorgung, die ein weniger technisches als mehr ein soziales Motiv darstellt. Neben einer steigenden Partizipation von Stakeholdern an der Energieversorgung wird ebenso eine Veränderung der Eigentumsverteilung verstanden.

Bürgerenergie-Projekte eröffnen einerseits Möglichkeiten einer alternativen Finanzierung und führen ebenso zu einer dezentralen Verteilung Erneuerbarer durch ihren meist regionalen Charakter. Der BUND betont die Rolle von dezentralen Bürgerenergie-Projekten als „Garant der Energiewende“, der Ausbau erneuerbarer Energien wird laut BUND also durch eine dezentrale Orientierung gesichert und vorangetrieben (BUND, 2016). Auch der Verband Kommunaler Unternehmen e.V. (VKU) spricht sich für einen Erhalt der Bürgerenergie aus, um so die „Akteursvielfalt einer zukünftigen Energielandschaft“ und die Akzeptanz der Energiewende zu sichern (Verband Kommunaler Unternehmen (VKU), 2016). Der Bundesverband Deutscher Industrie e.V. (BDI) auf der anderen Seite sieht einen effizienten Ausbau erneuerbarer als zentrales Ziel. So sprach sich der Verband beispielsweise für die Absenkung der Teilnahmegrenze am Ausschreibungsverfahren im Bereich von Photovoltaikanlagen aus (BDI, 2016). Befinden sich Anlagen im Wettbewerb zueinander, so wird ein zentraler Ausbau von Anlagen in Regionen mit besonders attraktiven Standorten forciert. Besonders kleine Akteure können sich im Wettbewerb nur schwer behaupten. Eine ähnliche Ansicht haben die deutschen Bischöfe, die betonen, dass ein zentraler Ausbau erneuerbarer Energien schlussendlich effizienter sein wird (Die deutschen Bischöfe - Kommission für gesellschaftliche und soziale Fragen, 2013).

### 3.1.3. Dezentrale vs. Zentrale Steuerung

Die klassische Organisation des Stromsystems ist durch einen Transport von zentralen Erzeugungsanlagen hin zu Verbrauchern geprägt. Durch die steigende Zahl an erneuerbaren Erzeugern, die in niederen Netzebenen zu finden sind, kann ebenso eine Versorgung von Verbrauchern durch diese oft lastnahen Erzeuger realisiert werden. Die Möglichkeit dieses dezentralen Ausgleichs stellt die Grundlage

für eine mögliche Umsetzung von alternativen dezentralen Steuerungskonzepten dar, die dem konventionellen zentralen Ausgleich durch den Markt gegenüber stehen.

### Fragestellung/Problemaufriss

Gründe für eine Neuausrichtung der Systemsteuerung können die angesprochene Neuverteilung von Erzeugungskapazitäten und daraus resultierende Netzprobleme sein. Aber auch die Unterstützung einer regionalen Wertschöpfung oder ein steigender Bedarf nach regionalen Energieprodukten können Gründe für die Dezentralisierung des Systemausgleichs sein. Mögliche Steuerungsansätze, die der klassischen zentralen Optimierung gegenüberstehen sind der Ansatz des Nodal Pricing und ein zell-ähnlicher Ausgleich. In der folgenden Tabelle sind diese Optionen dargestellt.

Tabelle 5: Übersicht über mögliche Steuerungsformen des Stromsektors (Quelle: Eigene Darstellung)

Möglichkeit	Beschreibung	Pro	Contra
Nodal/Zonal Pricing	<ul style="list-style-type: none"> <li>Zentraler Ausgleich unter Berücksichtigung des Netzes</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Kostenoptimale Lösung</li> <li>Berücksichtigung von Leistungsüberschüssen/-defiziten an Netzknoten</li> <li>Optimaler Ausbau neuer Kapazität</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Nicht kostenoptimal</li> <li>Möglicherweise Liquiditätsprobleme</li> <li>Ungünstig für EE, die entfernt von Lastzentren sind</li> </ul>
Zentrale Optimierung	<ul style="list-style-type: none"> <li>Ausgleich durch einen zentralen Markt</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Second Best Lösung</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Keine Berücksichtigung des Netzes oder regionalen Einflüssen</li> </ul>
Regionaler Ausgleich	<ul style="list-style-type: none"> <li>Ausgleich im Rahmen regionaler Märkte unabhängig vom Netz</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Berücksichtigung regionaler Komponente</li> <li>Investitionsanreize regionaler Produkte</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Hoher Koordinationsaufwand;</li> <li>Marktstrukturen notwendig</li> </ul>
Eigenverbrauch	<ul style="list-style-type: none"> <li>Verbrauch von selbst erzeugtem erneuerbaren Strom</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Investitionen in erneuerbare Energien werden gefördert</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Erhöhte Investitionen in Erzeugungs- und Flexibilitätskapazitäten notwendig</li> </ul>

### Unsicherheit und externe Treiber

- Funktionalität bei mangelndem Übertragungsnetzausbau
- Kosteneffekte auf Verbraucher nicht absehbar
- Gefahr von Marktmacht
- Mögliche Liquiditätsprobleme
- Regulatorische Implementierung unklar; Datenaufwand schwer abzuschätzen

### Wechselwirkungen mit anderen Richtungsentscheidungen

- 
- Zentrale vs. dezentrale Verteilung erneuerbarer Energien
  - Flexibilitätsbedarf und ausgeglichener vs. fokussierter Flexibilitätenmix
  - Netzausbau vs. alternative Optionen (incl. Flexibilität)
  - Konventionelles Erdgas vs. Gasnetz als Langzeitspeicher
- 

## **Beschreibung der Ausgestaltungsmöglichkeiten**

### *Zentrale Steuerung*

Der dargestellte zentrale Ausgleich ist die derzeit angewandte Form der Koordination zwischen Erzeugung und Verbrauch. Dabei werden über einen zentralen Markt Erzeugung und Verbrauch in Einklang gebracht. Bei dieser Ausgleichsform findet im Optimalfall eine kosteneffiziente Deckung (Ockenfels et al., 2008) des Strombedarfs statt. Allerdings erfolgt hierbei keine Berücksichtigung des Netzzustands. Engpässe und Spannungsabweichungen müssen daher durch einen nachträglich ausgeführten Redispatch korrigiert werden. Je unsicherer bzw. geringer der Ausbau des Übertragungsnetzes als Grundlage für die zentrale Optimierung des Systems ist, desto stärker kann die Kosteneffizienz eingeschränkt werden.

### *Nodal / Zonal Pricing*

Im Rahmen des Nodal oder Zonal Pricings wird für jeden Netzknoten oder jede Zone ein Preis unter Berücksichtigung der Übertragungsnetzkapazitäten ermittelt (Mohrhauer, 2016). Erzeugung und Verbrauch orientieren sich so an dem in ihrer Zone herrschenden Preis und ein am Netz orientierter Ausbau von Kapazitäten erfolgt. Bei hohen Preisen an einem Netzknoten wird eine Investition in Kraftwerksleistung angereizt, um dort Strom zu hohen Preisen bereit zu stellen. An Knoten niedriger Preise wird eine Verbrauchserhöhung angereizt. Da allerdings potenziell nur eine geringe Zahl an Akteuren an einem regionalen Marktplatz teilnimmt, besteht die Gefahr der Wettbewerbsverzerrung und Preisabsprachen, der Rechnung getragen werden muss. Ebenso sind die Auswirkungen auf Verbraucher zu berücksichtigen, die sich aus regional unterschiedlichen Strompreisen ergeben können (ECN, 2012). So könnte es in Regionen mit geringen Erzeugungskapazitäten und hoher Nachfrage zu einem Anstieg des Strompreises kommen. Dies ist dann problematisch, wenn Verbraucher keine ausreichende Flexibilität aufweisen, um auf Strompreisentwicklungen zu reagieren oder aber steigende Strompreise einen hohen Einfluss auf die Wirtschaftlichkeit eines Betriebs haben. Dies wäre beispielsweise in Industrie-Regionen in Süddeutschland problematisch.

### *Dezentrale Steuerung*

Regionale Märkte können anhand von unterschiedlichen Kriterien eingeteilt werden. Beispielsweise können administrative Einheiten zugrunde gelegt werden, um einen Marktbereich abzugrenzen. Ebenso ist eine Einteilung nach Regelzonen oder Verteilnetzgebieten möglich. Die Umsetzung regionaler Märkte unterscheidet sich von Nodal / Zonal Pricing dadurch, dass hier der regionale Handel im Vordergrund steht, und zwar unabhängig von Netzengpässen. Dementsprechend spielt auch regionale Flexibilität eine wichtige Rolle, einschließlich der nachfrageseitigen. Voraussetzung dafür ist jedoch, dass eine Partizipation ohne hohe Transaktionskosten möglich ist (Agsten et al., 2012). Grundlage dafür sind Erzeugung- und Verbrauchsdaten, die eine transparente Abbildung und Koordination ermöglichen. Ebenso ist ein Einsatz von Aggregatoren, die die Koordinationsaufgabe für verbrauchsseitige Flexibilität übernehmen, möglich. Neben Strom kann auch der Wärme- und Mobilitätssektor in einer Zelle berücksichtigt werden, die als Senke für erneuerbaren Strom dienen und so Flexibilität anbieten (VDE, 2015).

Strom wird momentan als ein homogenes Gut gehandelt. Faktoren wie Herkunft, Erzeugungstechnologie oder Erzeuger werden dabei nicht berücksichtigt. Im Rahmen des regionalen Stromhandels kann Strom eine regionale Komponente hinzugefügt werden, um so den Strom als regional zu kennzeichnen. Dies könnte zu einer erhöhten Zahlungsbereitschaft führen und ebenso Akzeptanz von erneuerbaren Projekten erhöhen, da die erzeugte Energie mit der Region in Verbindung gebracht wird (Agora Energiewende, 2017).

Wie genau eine Implementierung regionaler Märkte aussehen soll ist derzeit noch unklar. Ungeklärt sind zudem Fragen der Koordination zwischen Zellen, die horizontal und vertikal in Bezug zu einander stehen (VDE, 2015). Gegen eine Implementierung von Zellen und regionalen Märkten spricht, dass

positive Effekte, die durch die Optimierung über ein größeres Gebiet entstehen, ausbleiben. Hierbei handelt es sich um überregionale Ausgleichseffekte, die zu einer Reduktion des Flexibilitätsbedarfs und somit zur Kosteneffizienz beitragen (UBA, 2015b).

In eine ähnliche Richtung geht die Frage, ab welchem Zeitpunkt ein Handel zwischen Akteuren in unterschiedlichen Zellen ermöglicht werden soll. Ebenso wie bei überregionalen Ausgleichseffekten sinken durch eine Einschränkung des Optimierungsraumes die Möglichkeiten, Systemkosten durch kostengünstigeren Strom zu reduzieren. Dies führt zu höheren notwendigen Investitionen in Kapazitäten (Agora Energiewende et al., 2013).

### *Eigenverbrauch*

Ein weiterer dezentraler Steuerungsansatz ist der Eigenverbrauch von erneuerbarer Elektrizität. Dieser findet besonders auf Haushaltsebene in Verbindung mit PV-Dachanlagen statt. Dies ist dann wirtschaftlich, wenn der eingesparte Endverbraucher-Strompreis höher als die eigentliche PV-Vergütung ist. Der Einsatz eines Batteriespeichers kann zur Erhöhung des Eigenverbrauchsanteils am erzeugten Strom beitragen (ISEA RWTH Aachen, 2016) und wird aktiv gefördert (Kreditanstalt für Wiederaufbau, 2016). Durch den direkten Verbrauch von Strom kann die aus dem Netz bezogene Strommenge und die Einspeisung von PV-Strom reduziert werden. Trotz dieser Vorteile führt ein erhöhter Eigenverbrauch dazu, dass eine größere Menge an Erzeugungs- und Flexibilitätskapazitäten zugebaut werden muss. Der Grund dafür ist, dass auch in Zeiten von Strombedarf in anderen Netzregionen eine Einspeicherung erfolgen kann. Strom, der so direkt verbraucht werden könnte, wird gespeichert und muss anders bereitgestellt werden

### **Stakeholderpositionen**

Eine dezentrale Ausgestaltung der Systemkoordination wird durch Stakeholder im Bereich der Grünstrom (Agora Energiewende, 2017) oder Flexibilitätsvermarktung (Bogensperger et al., 2017) vorgeschlagen und ist Gegenstand verschiedener Forschungsprojekte (bspw. (Smart Grids-Plattform Baden-Württemberg, 2017). (Agora Energiewende, 2016a) spricht sich ebenso dafür aus einen sicheren Rechtsrahmen für Eigenversorgung zu schaffen und so dauerhafte Geschäftsmodelle zu ermöglichen. Das (DIW, 2016) nennt verschiedene Vorteile der Eigenversorgung, wie eine gesteigerte Akzeptanz durch das Verbrauchersegment der Prosumer oder eine geringere Auslastung der Netze. Das volkswirtschaftliche Optimum würde jedoch durch die aktuellen Anreizstrukturen verfehlt. Das (ZEW, 2013) nennt das Market Splitting, das eine Subform des Nodal Pricing darstellt, als eine Option einen kosteneffizienten Ausbau erneuerbarer Energien zu fördern. Das (DIW, 2015) spricht sich hingegen dagegen aus: „Zwei Preiszonen für Deutschland sind keine Lösung“. Positive Effekte in der Netznutzung seien aktuell nur unwesentlich zu beobachten und es seien erhöhten Transaktionskosten und eine reduzierte Marktliquidität zu befürchten

Auch das (BMWl, 2014) spricht sich gegen eine Einführung dezentraler Steuerungsansätze aus um ein auseinanderdriften von Preisen in den verschiedenen Zonen zu vermeiden. Ein Gutachten von (Frontier Economics & Consentec, 2011) für die Bundesnetzagentur kommt unter anderem zu dem Ergebnis, dass es durch die Einführung von Preiszonen zu einer Gefahr der Marktkonzentration kommen könnte. Die größten Unternehmen würden dann einen erheblichen Anteil der installierten Kapazitäten ausmachen.

### **3.1.4. Flexibilitätsbedarf und ausgeglichener vs. fokussierter Flexibilitätenmix**

Das konventionelle Stromsystem, das durch die Erzeugung von fossilen Kraftwerkstechnologien geprägt war, orientierte den Einsatz seiner Kraftwerke an der Nachfrage. Durch die Erhöhung des Anteils erneuerbarer Energien an der Stromerzeugung ist es nicht mehr möglich, dieser Systemlogik weiter zu folgen. Der Grund dafür ist die fluktuierende Stromerzeugung aus Sonne und Wind, die während des Tages und zwischen Jahreszeiten von der benötigten Nachfrage abweichen kann.

### **Fragestellung/Problemaufriss**

Eine Auswertung des Bedarfs an Flexibilitäten wurde durch unterschiedliche Studien durch eine Untersuchung der Residuallast durchgeführt. Die Residuallast stellt die Differenz zwischen Last und fluktuierender Erzeugung dar. In der folgenden Abbildung sind unterschiedliche ermittelte Residuallastmaxima

und –minima zu erkennen. Es ist zu erkennen, dass die Residuallast in unterschiedlichen Studien ähnliche Größen aufweist. So befinden sich die positiven Residuallastmaxima in einem Bereich zwischen 70 und 80 GW. Die negativen Residuallastminima weisen hingegen eine größere Schwankung auf zwischen 10 und 40 GW in 2030. Im Jahr 2050 sind für die positive Residuallast nur geringe Unterschiede zur Residuallast des Jahres 2030 zu erkennen. Im Bereich der negativen Residuallast hingegen ist eine größere Bandbreite und höhere Werte in 2050 im Vergleich zu 2030 erkennbar.

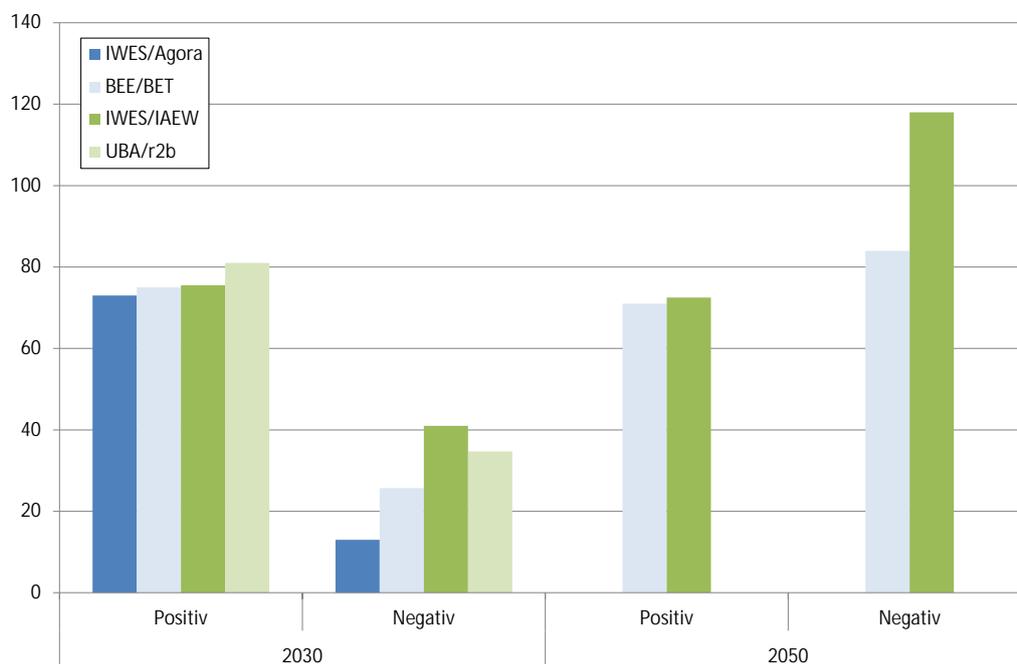


Abbildung 9: Übersicht über die Entwicklung der Residuallast im Jahr 2030 (50% EE) und 2050 (80% EE) verschiedener Studien (Quelle: Eigene Darstellung basierend auf (BEE, 2013; Fraunhofer IWES et al., 2014; Fraunhofer IWES et al., 2015; UBA, 2015a))

Diese Abweichung von Erzeugung und Verbrauch kann durch verschiedene Optionen ausgeglichen werden, die ein zeitliches oder räumliches Verschieben von Strom ermöglichen. Zu diesen Flexibilitätsoptionen zählen neben konventionellen Kraftwerken Kurz- und Langzeitspeichertechnologien, das Stromnetz oder aber eine Flexibilisierung der Nachfrage selbst, einschließlich neuer Stromverbraucher im Rahmen der Sektorkopplung. In der folgenden Tabelle ist eine Übersicht verschiedener Flexibilitätsoptionen dargestellt, die im Rahmen des Ausbaus erneuerbarer Energien diskutiert werden.

Tabelle 6: Übersicht über Flexibilitätsoptionen (Quelle: Eigene Darstellung)

Möglichkeit	Beschreibung	Pro	Contra
Netzausbau (Übertragungsnetze)	· Bereitstellung inter-regionaler Flexibilität	· Derzeit günstigste Flexibilitätsoption;	· Potenziell geringe Akzeptanz in der Bevölkerung
		· Erschließt regionale Ausgleichseffekte;	
		· Reduziert Abregelung	
Gaskraftwerke	· Ausgleich von erneuerbaren Erzeugungsdefizienten	· Längere Zeiträume ohne EE-Erzeugung können über-	· Mögliche geopolitische Gefährdung der Versorgung ohne Nutzung erneuer-

		brückt werden („dunkle Flaute“)	erbaren Gases
		· Bereits bestehende Infrastruktur	· CO <sub>2</sub> Emissionen bei Nutzung und Gas-transport
Demand Side Management	· Flexibilisierung der Nachfrage, Ausrichtung an EE Erzeugung	· Günstige Flexibilitätsoption	· Praktisch erschließbare Potenziale relativ gering. Immer gekoppelt an eine Nachfrage nach einem anderen Gut.
Sektorkopplung	· Nutzung von Erneuerbarem Strom im Wärme und Mobilitätssektor	· Dekarbonisierung im Wärme-, Industrie- und Mobilitätssektor	· Hohe Investitionen in Infrastruktur notwendig. Überschüsse sind dafür nicht geeignet, vielmehr werden neue EE-Kapazitäten benötigt. Neue Nachfrager bringen zunächst auch zusätzliche Inflexibilität.
Power-to-Gas	· Aufnahme von Erzeugungsüberschüssen	· Saisonaler Stromspeicher	· Hohe Kosten · Geringe Wirkungsgrade
Batteriespeicher	· Aufnahme von Erzeugungsüberschüssen und deren Abgabe	· Verfügt über hohe Modularität und Mobilität	· Probleme mit der Ressourcenverfügbarkeit können auftreten.
Pumpspeicherkraftwerke	· Aufnahme von Erzeugungsüberschüssen und deren Abgabe	· Geringer Umwelteinfluss	· Stark begrenzte Potenziale

Die in der Tabelle dargestellten Flexibilitätsoptionen umfassen einerseits konventionelle Optionen, die bereits heute Flexibilität im Stromsystem bereitstellen. Andererseits kann Flexibilität auch durch innovative Optionen bereitgestellt werden, die heute nur marginal oder erst in Zukunft zum Einsatz kommen können.

#### *Netzausbau*

Der Ausbau der Übertragungsnetze stellt die derzeit günstigste Flexibilitätsoption dar (Bürgerdialog Stromnetz, 2015) und trägt dazu bei, Abregelung von Erzeugung zu reduzieren und Potenziale einer räumlichen Verteilung der Erneuerbaren zu erschließen, Dadurch entstehen regionale Ausgleichseffekte, die zu einer Verstärkung der erneuerbaren Erzeugung beitragen, siehe dazu auch Kapitel Zentrale vs. dezentrale Verteilung erneuerbarer Energien. Diese Effekte haben einen positiven Effekt auf die Form der Residuallast, was Energiemengen und Lastgradienten betrifft (Mono et al., 2014; Wimmer et al., 2014)..

Unklar ist die genaue zukünftige Verteilung der erneuerbaren Energien, weshalb ein aufwendiger Planungsprozess notwendig ist um einen adäquaten Netzausbau zu realisieren. Zusätzlich sieht sich der Netzausbau einer großen Opposition in betroffenen Teilen des Landes gegenüber, u.a. bedingt durch

den Einfluss auf das Landschaftsbild, siehe Kapitel Netzausbau vs. alternative Optionen (incl. Flexibilität).

#### *Gaskraftwerke*

Auch etablierte Technologien wie Gaskraftwerke können als Flexibilitäten genutzt werden. Hierbei ist zu berücksichtigen, dass obwohl diese eine hohe Effizienz aufweisen CO<sub>2</sub> Emissionen entstehen, wenn keine synthetischen Gase auf der Basis erneuerbarer Energien genutzt werden, siehe dazu auch das Kapitel Konventionelles Erdgas vs. Gasnetz als Langzeitspeicher. Im Gegensatz zu Optionen wie DSM können mit Gaskraftwerken auch längere Zeiträume ohne ausreichende EE-Erzeugung überbrückt werden („dunkle Flaute“).

#### *Demand Side Management*

Eine weitere Option ist die Flexibilisierung der Nachfrage. Im Rahmen des sogenannten Demand Side Managements (DSM) werden Flexibilitätpotenziale erschlossen, die eine Ausrichtung des Verbrauchs an der jeweiligen erneuerbaren Erzeugung ermöglichen (Apel et al., 2012). Besonders geeignet sind Sektoren mit dem Potenzial einer Unterbrechung von Produktionsprozessen oder zeitlicher Flexibilität von Prozessen. Beispiele hierfür sind die Produktion von Zement oder Aluminium sowie Kühl- und Wärmeprozesse. Ein Vorteil dieser Option ist, dass die notwendige Infrastruktur bereits weitgehend vorhanden ist und relativ geringe Kosten für die Aktivierung anfallen. Allerdings sind die Potenziale, die keine Investition in zusätzliche Speicher, wie z.B. Produktspeicher erfordern, begrenzt und die Flexibilität wird immer auch begrenzt durch die jeweiligen Produktions- bzw. Nutzungsprozesse. In Zukunft ist die Revision der regulatorischen Rahmenbedingungen notwendig, um eine Integration dieser Option umzusetzen.

#### *Sektorkopplung*

In Zukunft wird die Kopplung der Sektoren Wärme und Mobilität mit dem Stromsektor an Bedeutung gewinnen (siehe Kapitel Sektorkopplung Elektrifizierung vs. synthetische Brennstoffe). Neben der Dekarbonisierung anderer Sektoren kann dies zusätzliche Flexibilität für den Stromsektor in Überschusszeiten bereitstellen (AEE, 2016). Damit große Mengen an erneuerbarer Energie in diesen Sektoren genutzt werden können, sind jedoch Investitionen in eine Infrastruktur notwendig, die die Nutzung von Strom ermöglicht (Fraunhofer Institut für Windenergie und Energiesystemtechnik et al., 2015). Dies sind etwa Wärmenetze oder Ladeinfrastruktur im Bereich der Elektromobilität. Wenn es darum geht, den Anteil der erneuerbaren Energien in den Sektoren zu erhöhen, dann reicht es allerdings nicht aus, sich auf „Überschussstrom“, der nicht in ausreichendem Maße vorhanden sein wird, zu beschränken. Vielmehr müssen EE-Kapazitäten dafür weiter ausgebaut werden. Die zusätzliche Nachfrage im Stromsektor führt so zu einem erhöhten Bedarf an erneuerbarem Strom, der den Bedarf an Flexibilität zunächst erhöht – ein Effekt, der durch die Flexibilisierung der neuen Nachfrager ggf. wieder kompensiert werden kann.

#### *Power-to-Gas*

Bei den Sektorkopplungstechnologien kann auch die Nutzung von Strom zur Synthese von erneuerbarem Gas eine Rolle spielen, das dann wiederum in Gaskraftwerken zur Stromerzeugung genutzt werden kann. Bei dieser Option kann die bereits vorhandene Gasinfrastruktur als saisonaler Energiespeicher dienen. Strom kann in Form von Wasserstoff oder Methan gespeichert werden. Die Synthese von Methan setzt hierbei eine CO<sub>2</sub> Quelle voraus. Die gesamte Prozesskette einschließlich der Rückverstromung führt zu sehr niedrigen Wirkungsgraden im Bereich von 35% (dena, 2016b). Unter derzeitigen regulatorischen Rahmenbedingungen und geringer Zahl an Überschusszeiten erneuerbaren Energien ist ein wirtschaftlicher Betrieb nicht möglich. Ob ein hoher Bedarf an erneuerbarem Gas in Zukunft gedeckt werden kann, hängt stark vom Vorhandensein einer ausreichenden Menge erneuerbarem Stroms ab oder einer Versorgung mit erneuerbaren Energieträgern aus Drittstaaten. Diese Versorgung kann gegebenenfalls durch geopolitische Unsicherheiten beeinträchtigt werden.

#### *Batteriespeicher*

Batteriespeicher kommen aktuell besonders in Verbindung mit Photovoltaikanlagen zur Erhöhung des Eigenverbrauchs von Haushalten zum Einsatz. Zukünftig ist denkbar, dass Batterien, die mit einer größeren Kapazität ausgestattet sind auch ohne eine direkte Verbindung zu einer Erzeugungsanlage zum Einsatz kommen. Aufgrund ihrer Modularität und Mobilität ist der Einsatz dieser Technologie sehr flexibel. Problematisch kann gegebenenfalls die Abhängigkeit von kritischen Ressourcen sein, deren Import aus Drittländern notwendig ist.

#### *Pumpspeicherkraftwerke*

Die sehr etablierte Technologie der Pumpspeicherwerke speichert Strom in Form von Potenzialenergie. Dabei wird in Stromüberschusszeiten Wasser von einem niedrigeren in ein höheres Reservoir gepumpt. Anschließend wird Strom von beim Rückfluss angetriebenen Turbinen erzeugt. Diese Technologie hat einen verglichen mit anderen Technologien geringeren Umwelteinfluss, weist jedoch stark begrenzte Potenziale auf.

Für die Gestaltung der Energiewende stellt sich die Frage, wie der oben dargestellte Flexibilitätsbedarf abgedeckt werden kann und wie die dargestellten Optionen dafür kombiniert werden können. So wurden zum Beispiel von Bauknecht et al. (2016) verschiedene Flexibilitätswelten, d.h. Kombinationen von Flexibilitätsoptionen, für das Szenarienjahr 2030 mit einem EE-Anteil von ca. 60% skizziert. Dabei spielt in allen Welten ein EU-weiter Ausgleich eine wichtige Rolle.

„Dezentral“: Zubau von Flexibilitätsoptionen auf der dezentralen Ebene. Dabei wurde die Last der Elektrofahrzeuge, der Haushalte und der relevanten Branchen im Sektor GHD flexibilisiert.

„Zentral“: Zubau von Flexibilitätsoptionen auf der zentralen Ebene (Zubau von Pumpspeicherwerken und Druckluftspeichern sowie Flexibilisierung der Lasten der stromintensiven Industrie)

„Wirtschaftlichkeit“: Zubau von Flexibilitätsoptionen nach dem Kriterium „Wirtschaftlichkeit“.

„Gasturbinen“: Zubau von Gasturbinen nach dem heutigen Stand der Technik.

Je nach Szenario sind auch andere Kombinationen denkbar. Für den hier vorgestellten Überblick über wesentliche Pfadentscheidungen beschränken wir uns auf zwei Varianten: einen ausgeglichenen bzw. einen fokussierten Flexibilitätenmix.

Tabelle 7: Übersicht über Gestaltungsformen des Flexibilitätsmix (Quelle: Eigene Darstellung)

Möglichkeit	Beschreibung	Pro	Contra
Ausgeglichener Flexibilitätenmix	<ul style="list-style-type: none"> <li>Unterschiedliche Optionen stellen Flexibilität für das System bereit. Verfügbare Technologien werden in gleichem Maße gefördert.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Verschiedene Optionen können entwickelt, Lernkurven erschlossen werden</li> <li>Auch Flexibilitäten mit geringen Potenzialen können zum Einsatz kommen</li> <li>Unterschiedliche Optionen können in unterschiedlichen Situationen eingesetzt werden</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Ggf. höhere Kosten durch parallele Optionen/Infrastrukturen</li> </ul>
Fokussierter Flexibilitätenmix	<ul style="list-style-type: none"> <li>Der Fokus der Deckungs des Flexibilitätsbedarfs liegt auf den wirtschaftlichsten Flexibilitätsoptionen. Andere Optionen spielen nur eine Nebenrolle.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Ggf. höhere Wirtschaftlichkeit</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Geringe Optionalität</li> <li>Ggf. regionale Einschränkung durch Flexibilitätspotenziale</li> </ul>

**Unsicherheit und Externe Treiber**

- 
- Zukünftige Verteilung erneuerbarer Energien
  - Zukünftige Entwicklung der regulatorischen Rahmenbedingungen
  - Möglicher Anstieg des Flexibilitätsbedarfs durch Nachfrageanstieg.
  - Ausreichende Mengen an erneuerbarem Gas notwendig
  - Ausreichende CO<sub>2</sub> Versorgung notwendig
- 

### **Wechselwirkungen mit anderen Richtungsentscheidungen**

---

- Verstärkter vs. begrenzter Einsatz von Power-to-Heat Technologien
  - Konventionelles Erdgas vs. Gasnetz als Langzeitspeicher
  - Zentrale vs. dezentrale Verteilung erneuerbarer Energien
- 

### **Beschreibung der Ausgestaltungsmöglichkeiten**

In Tabelle 7 sind die unterschiedlichen Ausgestaltungsformen eines Flexibilitätenmix dargestellt. Dabei steht ein fokussierter einem ausgeglichenen Flexibilitätenmix gegenüber.

#### *Ausgeglichener Flexibilitätenmix*

Bei einem ausgeglichenen Flexibilitätenmix kommen unterschiedliche Flexibilitäten gemeinsam zum Einsatz, um einen Ausgleich zwischen Erzeugung und Verbrauch zu realisieren. Im Unterschied zu einem fokussierten Flexibilitätenmix, können bei einem ausgeglichenen Mix alle Optionen gleichermaßen zum Einsatz kommen. Im Fall einer Förderung von Flexibilitäten, kommt es nicht zu einer fokussierten Förderung. Alle verfügbaren Optionen werden in einem solchen Fall gleich behandelt. So kann es bei allen Flexibilitätsoptionen zu Lerneffekten und daraus resultierenden Kostenersparnissen kommen. Werden mehrere Technologien gleichzeitig ausgebaut kann es allerdings zum Entstehen von parallelen Flexibilitätsstrukturen und dadurch zu Effizienzverlusten kommen.

Neben Optionen, die über große Flexibilitätspotenziale verfügen kommen in dieser Variante auch andere Optionen zum Einsatz, die nur über geringe Potenziale verfügen. Daraus folgt insgesamt eine größere Zahl an vorhandenen Flexibilitätsoptionen. Das Vorhandensein einer großen Bandbreite an Techniken zur Deckung des Flexibilitätsbedarfs, ermöglicht einen Einsatz von verschiedenen Flexibilitäten in unterschiedlichen Situationen. So können Optionen zum Einsatz kommen, die für einen bestimmten Zweck besonders geeignet sind.

#### *Fokussierter Flexibilitätenmix*

Ein fokussierter Flexibilitätenmix zeichnet sich durch eine kosteneffiziente Deckung des Flexibilitätsbedarfs aus. Zum Einsatz kommen daher besonders Flexibilitäten, die sich im Wettbewerb mit anderen Flexibilitätsoptionen behaupten können. Ein Einsatz kostenintensiver Technologien wird in dieser Form der Bereitstellung nicht ausgeschlossen, diese kommen vor der Prämisse eines jedoch seltener zum Zug. Daraus resultiert eine höhere Wirtschaftlichkeit dieser Option bei der Deckung des Flexibilitätsbedarfs.

Der höheren Wirtschaftlichkeit dieser Option steht gegenüber, dass eine Konzentration auf kosteneffiziente Flexibilitäten die Optionalität des Flexibilitätenparks reduziert. Optionen, die bei einer gleichmäßigen Förderung bereits entwickelt wären, sind bei einem fokussierten Flexibilitätseinsatz gegebenenfalls noch nicht einsatzbereit. Dies kann dann zu einem Nachteil führen, wenn es sich um Technologien handelt, deren Anwendung in bestimmten Fällen besonders geeignet ist.

Da bei einer Fokussierung des Flexibilitätenmix wenige Technologien vorrangig eingesetzt werden, werden die Potenziale dieser Technologien schneller erschlossen als bei anderen Flexibilitätsoptionen, die nicht im Fokus liegen. Besonders Technologien, die regionale Potenzialgrenzen aufweisen, können in diesen Regionen an ihre Grenzen stoßen. Ein Beispiel dafür ist der Einsatz von industriellem Demand Side Management, der abhängig von der Verteilung von industriellen Stromverbrauchern ist.

### **Gegenüberstellung der Ausgestaltungsmöglichkeiten**

Wie der Flexibilitätsbedarf vorrangig gedeckt wird, hängt vom ausgewählten Kriterium ab. Unabhängig von der technischen Verfügbarkeit von Flexibilitätsoptionen ist es möglich eine kosteneffiziente oder eine ausgeglichene Deckung des Bedarfs anzustreben. In manchen Fällen können sich diese auch

stark ähneln. Nämlich dann, wenn nur eine begrenzte Zahl an Technologien zur Deckung des Flexibilitätsbedarfs zur Verfügung steht.

## Stakeholderpositionen

Wie genau der Flexibilitätsbedarf in Zukunft gedeckt werden soll und welche Rolle unterschiedliche Flexibilitäten spielen werden, wird von unterschiedlichen Akteuren verschieden bewertet. Der (BDEW, 2013) hat eine Einordnung unterschiedlicher Flexibilitätsoptionen nach ihrer Kosteneffizienz vorgenommen. Dabei unter anderem eine Optimierung des Netzbetriebs und Sektorkopplung als besonders kosteneffizient eingeschätzt. Die zukünftige Rolle der Sektorkopplung wird als wichtig beurteilt: Neben dem „Ziel einer Dekarbonisierung“ der Sektoren Wärme und Mobilität kann durch die „Flexibilisierung der Energienutzung“ eine erhöhte Integration erneuerbaren Stroms erreicht werden (BDEW, 2017a). Allerdings wird auch darauf verwiesen, dass es momentan keine Anreize gibt, Überschussstrom zu nutzen. ies betont auch (NEXT Kraftwerke, 2015). Die (DUH, 2017) erkennt die potenzielle Nutzung von Sektorkopplungstechnologien als Flexibilität zwar an, allerdings erscheint auf der Basis eine großskalige Integration von erneuerbarem Überschussstrom aus ihrer Sicht als kaum realistisch. Als Grund hierfür werden hohe notwendige Investitionen in Technologien und Infrastruktur genannt, die getätigt werden müssten.

(dena, 2016a) betont die Rolle des Demand Side Managements: „DSM [...] ist eine wichtige mögliche Flexibilitätsoption, die vermehrt genutzt werden könnte.“ und nennt Felder in denen Hindernisse für DSM bestehen. Das ist etwa im Bereich der Netzentgeltsystematik der Fall. Vor diesem Hintergrund wurde in diesem Jahr die „Taskforce Netzentgelte“ gegründet, um mit Praxisakteuren Vorschläge für Netzentgeltstrukturen zu entwickeln (dena, 2017). Auch das (BMWl, 2016a) hat in der Veröffentlichung *Strom 2030* auf die Notwendigkeit der Weiterentwicklung der Netzentgelte hingewiesen. So solle die „Weiterentwicklung der Netzentgeltsystematik die Nutzung systemdienlicher Flexibilität ermöglichen.“ (dena & geea, 2016) beschreiben die besondere Rolle der Power-to-Gas Technologie zur Bereitstellung saisonaler Flexibilität. Die Synthese von Erdgas sei derzeit der „einzige(r) großtechnische Langzeitspeicher“. Allerdings sind regulatorische Änderungen notwendig, um einen Nutzung von erneuerbarem Überschussstrom zu realisieren. Dies betont auch (Sternier, 2015): Obwohl diese Option großes volkswirtschaftliches Potenzial aufweise, sei eine Nutzung derzeit nicht betriebswirtschaftlich sinnvoll.

### 3.1.5. Netzausbau vs. alternative Optionen (incl. Flexibilität)

#### Fragestellung/Problemaufriss

Der Ausbau des Übertragungsnetzes zum Transport von Elektrizität und als Flexibilitätsoption (für eine detaillierte Betrachtung siehe hierzu das Kapitel Flexibilitätsbedarf und ausgeglichener vs. fokussierter Flexibilitätenmix) ist ein kontroverses Thema. Ein von Gegnern oft angegebener Kritikpunkt ist die Veränderung des Landschaftsbilds, das einen ästhetischen Wert für viele Bürger hat (Kühne, 2015). Betroffene Akteure suchen daher nach Optionen, um den notwendigen Netzausbau zu reduzieren oder durch andere Technologien zu substituieren.

Auch auf Ebene des Verteilnetzes wird der Netzausbau mit steigenden Anteilen erneuerbarer Energien notwendig werden. Zwar wird der Ausbau der Netze auf dieser Ebene weniger kritisch diskutiert, nicht-destotrotz besteht die Möglichkeit eines Ersatzes des konventionellen Ausbaus durch andere Optionen. Ob und wie eine Reduktion des Verteilnetzausbaus stattfinden kann, wird im Rahmen dieses Papiers allerdings nicht weiter verfolgt.

Unterschiedliche Optionen, die eine Substitution des Netzausbaus bewirken können, werden diskutiert. Eine Übersicht ist der folgenden Tabelle zu sehen.

Tabelle 8: Übersicht über potenzielle Alternativen zum Netzausbau (Eigene Darstellung)

Möglichkeit	Beschreibung	Pro	Contra
Gaskraftwerke im Süden	Erzeugung hinter einem Netzengpass	Zusätzliche Bereitstellung von Systemdienstleistungen	Fokussierung auf eine Technologie kann zu Lock-In Effekten führen.

Speicher	· Speicher vor einem Netzengpass	· Verschieben der Einspeisung Energie	· Hohe Kosten, Wirtschaftlichkeit	· Hoher Umwelteinfluss
Einsatz von Power-to-Gas	· Synthese Gas und Nutzung Gasnetz	· Nutzung vorhandener Infrastruktur	· Hohe Kosten, Wirtschaftlichkeit	· CO2 Quelle nötig
Dezentraler Ausgleich	· Lastnahe Erzeugung als Ersatz des Stromtransports	· Regionale schöpfung	· Wert-	· Größere Menge an Kapazität notwendig

---

### Unsicherheiten und externe Treiber

- Energiepreisentwicklung
- Unklare Regulatorik
- Unklare Kostenentwicklung
- Andere Faktoren notwendig bspw. Speicher/Flexibilitäten

---

### Wechselwirkungen mit anderen Richtungsentscheidungen

- Flexibilitätsbedarf und ausgeglichener vs. fokussierter Flexibilitätenmix
- Verstärkter vs. begrenzter Einsatz von Power-to-Heat Technologien
- Konventionelles Erdgas vs. Gasnetz als Langzeitspeicher

---

### Beschreibung der Ausgestaltungsmöglichkeiten

Das Problem, das mit einem Ausbau der Netze gelöst werden soll, ist ein auftretender Netzengpass und der damit verbundene Mangel an Übertragungskapazität. Neben einer Erhöhung der Übertragungskapazität können die unterschiedlichen Optionen Einsatz finden, um den Netzengpass anderweitig zu umgehen oder aber den Netzengpass durch eine Anpassung in Erzeugung oder Verbrauch aufzuheben.

#### *Gaskraftwerke im Süden Deutschlands in Verbindung mit Redispatch*

Redispatch stellt eine bereits heute genutzte Option dar um Netzengpässe aufzuheben. Dabei wird die Erzeugung vor einem Netzengpass reduziert und hinter einem Netzengpass erhöht. Auch wenn diese Option bereits heute Anwendung findet, stellt die heutige Verteilung von Kraftwerken die Ursache für die Netzengpässe dar. Ein erhöhter Ausbau und damit verbundene Erzeugung im Süden Deutschlands hinter einem Netzengpass kann eine Entlastung darstellen (N-ERGIE Aktiengesellschaft, 2016).

#### *Speicher*

Ein netzdienlicher Einsatz von Speichern kann zu einer Entlastung des Netzes beitragen (dena et al., 2012). Einer Speicherung erzeugten Stroms vor einem Netzengpass kann eine Entlastung des Engpasses folgen. Die benötigte Energie wird dann hinter einem Netzengpass erzeugt, wodurch dieser aufgehoben wird. Der eingespeicherte Strom kann zu einem späteren Zeitpunkt wieder ausgespeichert werden. Zeiten starker Netzbelastungen können so umgangen und verbundener Netzausbaubedarf reduziert werden. Auch wenn eine Entlastung des Übertragungsnetzes aus einem Speichereinsatz folgt sind diese in erster Linie im Verteilnetz verortet (juwi & RLI, 2015).

#### *Einsatz von Power-to-Gas zur Netzentlastung*

Die Speicherung von Strom in Form von Gas stellt eine weitere Option dar um einen Erzeugungsüberschuss vor einem Netzengpass zu reduzieren. Diese Option ähnelt von seiner Funktionsweise einer Netzentlastung durch andere Speichertechnologien. Im Unterschied zu elektrochemischen Stromspei-

cher, bei der die Einspeisung zeitlich verschoben wird, ermöglicht die Speicherung in chemischer Form als Wasserstoff oder Erdgas einen Transport über das Erdgasnetz und so eine räumliche Flexibilität. So kann Energie am Stromnetzengpass vorbei transportiert werden (VDE, 2015). Diese Option stellt allerdings nur eine sinnvolle Alternative zum Stromnetzausbau dar, wenn genügend nutzbare Strommengen vorliegen. Kommt es durch beispielsweise die Flexibilisierung der Nachfrage zu einer Reduktion des notwendigen Ausbaus, so reduziert dies die Potenziale einer Anwendung von Power-to-Gas.

### *Lastnahe Erzeugung*

Eine Erzeugung von Strom kann durch Technologien wie Photovoltaik, Wind und Biomasse auch lastnah realisiert werden. Ein Verbrauch dieser Energie am Ort der Erzeugung reduziert den Transport von Strom über das Übertragungsnetz. Somit würde auch der Bedarf eines Ausbaus des Übertragungsnetzes reduziert (VDE, 2015). Voraussetzung für diese Option ist allerdings, dass genug Flexibilitäten vorhanden sind, um einen lastnahen Verbrauch zu realisieren.

### *Dezentrale Steuerung (siehe auch Kapitel Dezentrale vs. Zentrale Steuerung)*

Eine weitere Alternative, die über die lastnahe Verteilung erneuerbarer Energien hinausgeht, ist die Organisation in dezentralen Strukturen. Diese strebt neben einem lastnahen Ausbau einen dezentralen Ausgleich an, der die Notwendigkeit eines Ausbaus des Übertragungsnetzes reduziert. Notwendig für diese Art des Ausgleichs ist das Vorhandensein ausreichender Flexibilitäten, die einen regionalen Ausgleich zwischen Erzeugung und Verbrauch möglich machen.

## **Gegenüberstellung der Ausgestaltungsmöglichkeiten**

Besonders bei hohen Anteilen erneuerbarer Energien von 80 bis 90% wird ein ausreichend ausgebautes Netz unumgänglich sein. Daher unterstützen heutige Investitionen in das Netz die Entwicklung hin zu einem notwendigen Endzustand. Ein Kraftwerkseinsatz zum Zwecke des Redispatches wird daher als kurzfristige Lösung für akute Probleme angesehen um die Funktionalität des Systems zu sichern und nicht als eine Alternative zum Netzausbau (BET, 2015). Alternative Optionen, die den Netzausbau substituieren, können daher den notwendigen Netzausbau bei hohen Anteilen EE nur verzögern.

Speichertechnologien können durch die Reduktion von Einspeisespitzen dazu beitragen, Übertragungs- und Verteilnetze zu entlasten (DVGW, 2015). Im Unterschied zur konventionellen Abregelung wird durch einen Speichereinsatz eine zeitlich verschobene Einspeisung realisiert. In Deutschland treten solche Situationen in küstennahen Regionen mit hoher Winderzeugung auf. Derzeit sind aufgrund mangelnder Wirtschaftlichkeit allerdings nur wenige Speichertechnologien im Einsatz. Es werden in erster Linie Pumpspeicherkraftwerke im deutschen Stromsystem betrieben. Die Ursachen dafür sind u.a. sinkende Börsenstrompreise durch die Einspeisung erneuerbarer Energien (Merit-Order Effekt (Sensfuß, 2011)), die eine Nutzung von innovativen Technologien, wie die der Langzeitspeichertechnologie Power-to-Gas oder Batteriespeicher, unwirtschaftlich machen (Missal, 2014). Unabhängig von der Wirtschaftlichkeit von Batteriespeichern ist hier ebenso die Frage zu stellen, wie der Einsatz kritischer Metalle für die Fertigung dieser Speicher beurteilt wird (Heinemann et al., 2016).

Neben der Wirtschaftlichkeit ist beim Einsatz von Speichern die Frage der Betriebsführung zu stellen. Es besteht die Möglichkeit, einen Speicher am Strommarkt zu betreiben oder aber zur Unterstützung des Netzbetriebs zu verwenden. Positive Effekte in Bezug auf das Netz treten jedoch in erster Linie in Verbindung mit einem netzgeführten Betrieb auf. In manchen Fällen kann es durch einen marktgeführten Betrieb sogar zu einer Mehrbelastung des Netzes kommen (dena et al., 2012). Der Einsatz von Speichern führt also nicht zwangsläufig zu einer Reduktion des Netzausbaubedarfs.

Die Organisation der Stromerzeugung in dezentralen Strukturen und damit eine vorrangige Nutzung regionaler Erzeugung über das Verteilnetz wird als Alternative zum Strombezug über das Übertragungsnetz gesehen. Da es nicht zu einer Nutzung der ertragreichsten Standorte für die Stromerzeugung kommt, sondern eher zu einer regionalen Gleichverteilung, ist eine größere Zahl an Erzeugungsanlagen notwendig, um die notwendige Menge an Strom bereitzustellen. Diese Organisationsform kann den Strombezug via Übertragungsnetz reduzieren, nichtsdestotrotz setzen Ausgleichsflüsse zwischen dezentralen Zellen das Übertragungsnetz voraus (VDE, 2015). Ein signifikant geringerer Ausbaubedarf im Übertragungsnetz kann bei einer dezentralen Steuerung jedoch nicht beobachtet werden (Öko-Institut & Offis, 2016).

Eine dezentrale Orientierung des Systems ist mit hohen Investitionen in Erzeugungs- und Flexibilitätskapazitäten verbunden und zieht ebenso einen hohen Koordinationsaufwand nach sich. Dezentrale

Systeme mit ausreichender Flexibilität und niedrigen Lasten können zwar zu großen Teilen auf die Nutzung des Übertragungsnetzes verzichten, allerdings sind für Verbraucher mit einem hohen Energie- und Wärmebedarf und geringer Flexibilität entsprechend hohe Investitionen in Flexibilitäten notwendig (Juwi & RLI, 2015; Peter, 2013; VDE, 2015). Neben technologischen Gesichtspunkten dieser Option wird als ein Vorteil dieser Möglichkeit die Steigerung der kommunalen Wertschöpfung genannt (Hirschl et al., 2010).

Ebenso wie Speicher können Gaskraftwerke nicht nur dazu beitragen, Netzengpässe zu managen, sondern sie können auch die Schwankungen erneuerbarer Energien ausgleichen oder andere Systemdienstleistungen bereitstellen. Der Einsatz von neuen Kraftwerken zur Entlastung von Netzengpässen stößt wie der Einsatz von Speichern auf Probleme: Der Merit-Order-Effekt, der sinkende Börsenstrompreise durch den Ausbau der Erneuerbaren beschreibt, macht eine Investition in Gaskraftwerke unwirtschaftlich. Dies kann durch steigende Energieträgerpreisen verstärkt werden, weshalb die Nutzung dieser Technologie zukünftig mit Unsicherheiten behaftet ist. Die Option der Gaskraftwerke wirft die Frage auf, welche Rolle in Zukunft konventionelle Technologien im Stromsystem einnehmen werden.

Eine weitere Option, die zur Reduktion des Netzausbaubedarfs diskutiert wird, ist der Transport von Gas über die bereits vorhandene Infrastruktur des Gasnetzes als Alternative zum Stromtransport. Hierfür kommt die Power-to-Gas Technologie zum Einsatz. Eine Synthese von erneuerbarem Gas, besonders in Regionen hoher erneuerbarer Einspeisung, kann Einspeisespitzen erneuerbarer Erzeuger aufnehmen. Das Stromnetz würde dadurch die Nutzung des Gasnetzes entlasten. Gegen diese Möglichkeit spricht, dass der Einsatz der Power-to-Gas Technologie mit hohen Kosten verbunden ist, die über die Kosten des Netzausbaus hinausgehen. Ein Einsatz dieser Option ist daher derzeit nicht wirtschaftlich (DVGW, 2015). Zudem sind hier hohe Energieumwandlungsverluste bei der Wasserstoffelektrolyse sowie besonders bei der möglichen Herstellung synthetischen Methans zu beachten. Im letzteren Fall wird zusätzlich eine Kohlenstoffquelle benötigt (Öko-Institut, 2014).

## Stakeholderpositionen

Im Diskurs zum Thema Alternativen des Netzausbaus werden unterschiedliche Standpunkte vertreten. Laut (DUH, 2015) stellen dezentrale Erzeugung und Redispatch keine sinnvollen Alternativen zum Netzausbau dar. Beauftragte Modellrechnungen zeigen, dass der Netzausbau „*volkswirtschaftlich die beste Lösung ist*“ (Schaber & Bieberbach, 2015). Der Grund hierfür ist eine hohe Menge an Engpassmanagement, die in 2024 ohne die im Bundesbedarfsplan ausgewiesenen Netzausbaumaßnahmen auf 10% der Gesamterzeugung gegenüber 1% im Jahr 2013 ansteigt (DUH, 2015). Auch der Bürgerdialog Stromnetz äußert sich zur Reduktion des Ausbaubedarfs durch eine dezentrale Orientierung des Systems. Im Hinblick auf die Gewährleistung der Versorgungssicherheit stellt der Übertragungsnetzausbau die ökonomischste Möglichkeit dar. Andere Lösungen sind denkbar. Die dezentrale Ausrichtung des Systems sei aber aufgrund hoher Speicherkosten und nicht ausgereiften Sektorkopplungskonzepten keine sinnvolle Alternative zu einem ausgeprägten Netzverbund, so der Bürgerdialog (Bürgerdialog Stromnetz, 2015).

Neben Stimmen, die sich gegen eine Reduktion des Netzausbaus aussprechen, gibt es ebenso Akteure, die sich für eine Reduktion durch Alternativen positionieren. Die Gleichstromtrasse Südlink, die Strom aus Norddeutschland zu süddeutschen Verbrauchszentren transportieren soll, stößt vielerorts auf großen Widerspruch. Der Bundesverband Bürgerinitiativen gegen Südlink stellt ein Netzwerk von Bürgerinitiativen dar, die gegen dieses Netzausbauvorhaben demonstrieren. In seiner Kritik beruft sich der Bundesverband darauf, dass ein simpler Netzausbau nicht den vielfältigen Herausforderungen gerecht werden könne (Bundesverband Bürgerinitiativen gegen Südlink, 2017). So bedürfe der Netzausbau ein „auf dezentrale Konzepte ausgerichtete Planung“. Grundlage für diese Aussage ist die Studie „Dezentralität und zelluläre Optimierung“, die von N-Ergie beauftragt wurde (Falkenberg et al., 2016). Das Reiner Lemoine Institut teilt die Ansicht, dass es durch einen Einsatz von Speichern im Verteilnetz zu einer Reduktion von Verteilnetzausbaumaßnahmen kommen kann. Der Grund dafür ist die Auslegung von Netzen für Belastungszustände, die nur in wenigen Stunden des Jahres auftreten. Eine Stabilisierung der Verteilnetze, die nicht für die fluktuierende Einspeisung erneuerbarer Energien ausgelegt sind, könnte durch Großbatterien realisiert werden (RLI, 2017).

### 3.1.6. Entwicklungspfade fossiler Energieträger

#### Kurzfristiger vs. später Ausstieg aus der Kohlestromerzeugung

Tabelle 9: Übersicht der Ausgestaltungsmöglichkeiten eines Kohleausstiegs (Quelle: Eigene Darstellung)

Möglichkeit	Beschreibung	Pro	Contra
Kurzfristiger und schneller Kohleausstieg	<ul style="list-style-type: none"> <li>· Kohleverstromung bis 2025, insbesondere durch strenge ordnungspolitische Maßnahmen und flankiert durch eine deutliche Verstärkung des EE-Ausbaus</li> <li>· Ausstiegstempo orientiert sich an den energiewirtschaftlich-technisch machbaren Grenzen</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>· Starker Klimaschutzbeitrag</li> <li>· Notwendig zur Einhaltung des 1,5° Ziels</li> <li>· Großes Potential durch Sektorkopplung auch kurzfristig Emissionsminderungen in anderen Sektoren zu erreichen</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>· Zusätzliche Investitionen in flexible Erzeugungskapazitäten (z.B. Gaskraftwerke) notwendig.</li> <li>· Kurze Zeit für Gestaltung eines Strukturwandels</li> <li>· Strompreis- und Systemkostensteigerungen</li> </ul>
Mittelfristiger und graduel-ler Kohleausstieg	<ul style="list-style-type: none"> <li>· Kohleverstromung bis 2035 mit graduel-ler Reduktion bei der fast alle Kraftwerke mind. 20 Jahren und max. 30 Jahre betrieben werden können.</li> <li>· Ausstiegstempo orientiert sich an betriebswirtschaftlichen Abschreibungsbe-rechnungen für individuelle Kraftwerks-laufzeiten</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>· Klimaschutzbeitrag im Rahmen der dt. Klimaschutzziele</li> <li>· Zeit für Gestaltung des Strukturwandels / Abfederung der negativen regionalöko-nomischen Auswirkungen</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>· Geringere CO<sub>2</sub>-Reduktion im Stromsektor um Sektorale Klimaschutzziele zu erreichen.</li> <li>· Erhöhter Druck anderer Sektoren bzgl. CO<sub>2</sub>-Reduktionen (ggf. mit höheren CO<sub>2</sub>-Vermeidungskosten)</li> </ul>
Später Koh-leausstieg	<ul style="list-style-type: none"> <li>· Kohleverstromung bis nach 2040 ohne zielgerichtete politische Maßnahmen oder Gestaltung der ökonomischer Rahmenbedingungen.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>· Langer Erhalt der Wertschöpfung und Arbeitsplätze in der Kohleindustrie</li> <li>· Geringe Systemkosteneffekte</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>· (Risiko der) Verfehlung der deutschen Klimaschutzziele im Stromsektor</li> <li>· Sehr hoher Druck anderer Sektoren bzgl. CO<sub>2</sub>-Reduktionen (mit wahr-scheinlich drastischen Maßnahmen)</li> <li>· Geringeres Potential durch Sektorkopp-lung Emissionsminderungen in anderen Sektoren zu erreichen</li> </ul>

- 
- Große Unsicherheit bezgl. der technischen Verfügbarkeit und Kosten der CCS Technologie
- 

### **Unsicherheit und externe Treiber**

---

- Europäische Regulierungsrahmen, insbesondere ETS und Vorgaben zu Kapazitätsmärkten (z.B. 550g Regel)
- 

#### Wechselwirkungen mit anderen Richtungsentscheidungen

---

- Entwicklung des Gesamtstrombedarfs (u.a. aufgrund der Sektorkopplung, Effizienz-Strategien, Im- und Export von Strom)
  - Flexibilitätsbedarf
  - Anwendung der Carbon-Capture-and-Storage (CCS) Technologie in breitem Maßstab
  - CO<sub>2</sub>-Einsparungspotential durch Stromnutzung im Mobilitätssektor (Sektorkopplung)
  - CO<sub>2</sub>-Einsparungspotential durch Stromnutzung im Wärmesektor (Sektorkopplung)
-

## Fragestellung/Problemaufriss

Die Stromversorgung und die energiewirtschaftliche Wertschöpfung in Deutschland sind trotz des starken Ausbaus der erneuerbaren Energien auch heute noch von der Stein- und Braunkohlestromerzeugung geprägt. Die Kohleverstromung ist sogar trotz des EE-Ausbaus nicht zurückgegangen (Energie-wende-Paradox). Im Jahr 2016 kamen ca. 40 % der Stromerzeugung in Deutschland aus Kohlekraftwerken. Aufgrund der hohen CO<sub>2</sub>-Intensität ist die Kohlestromerzeugung mit einem Anteil von ca. 80% (48 % Braunkohle- sowie 32 % Steinkohleverstromung) der Hauptverursacher von CO<sub>2</sub>-Emissionen im Stromsektor (UBA, 2017). Durch die derzeit bereits beschlossenen Klimaschutzmaßnahmen werden sich die derzeitigen Erzeugungskapazitäten von Kohlekraftwerken in Höhe von ca. 50 GW im Zeitraum bis 2040 um die Hälfte reduzieren (Agora Energiewende, 2016b; Hermann et al., 2017).

Mit diesem Rückgang und dem damit verbundenen Fortbestand eines großen Teils der Kohlestromerzeugung über 2040 hinaus können die deutschen Emissionsreduktionsziele im Stromsektor jedoch nicht erreicht werden (Öko-Institut & Fraunhofer ISI, 2015b). Der starken Reduktion der Kohlestromversorgung in den nächsten Jahrzehnten kommt daher eine entscheidende Rolle bei der Erreichung der Klimaschutzziele im Stromsektor zu.

Der Strombedarf in Deutschland wird sich voraussichtlich nicht wesentlich verringern (siehe Kapitel Stromsektor), sondern aufgrund der neuen Nachfrage aus dem Wärme- und Verkehrssektor mittel- bis langfristig wahrscheinlich noch steigern. Aus diesem Grund müssen die stillzulegenden Erzeugungskapazitäten der Braun- und Steinkohlekraftwerke in Teilen durch andere Erzeugungskapazitäten ersetzt werden, um das hohe Niveau der Versorgungssicherheit aufrechtzuerhalten, aber auch um ggf. die allgemeine Stromnachfrage insgesamt decken zu können. Die zusätzlich notwendigen Kapazitäten für die Versorgungssicherheit können durch eine Vielfalt an Optionen bereitgestellt werden. Hierzu gehören u.a. die Übernahme stillzulegender Kraftwerke in Reserven, die Steigerung der nachfrageseitigen Flexibilität, die Verfügbarmachung ausländischer Kraftwerkskapazität, neu zu errichtende Gasturbinenkraftwerke sowie zusätzliche Stromspeicher. Zur Deckung der allgemeinen Stromnachfrage und vor dem Hintergrund der langfristigen Dekarbonisierung der Stromversorgung ist auch in Teilen ein Verstärkter EE-Ausbau erforderlich. Ohne das Ersetzen der Kohleerzeugung durch weniger CO<sub>2</sub>-intensive oder CO<sub>2</sub>-freie Stromerzeugung kann der Stromsektor keine signifikante CO<sub>2</sub>-Reduktion erreichen und somit im Rahmen der Sektorkopplung auch keinen relevanten Klimaschutzbeitrag in anderen Sektoren leisten.<sup>2</sup>

Die Entwicklung der Kohlestromerzeugung spielt im Rahmen der Transformation des Energiesystems nicht nur eine wichtige Rolle für die Minderung der CO<sub>2</sub>-Emissionen und für den möglichen Bedarf an zusätzlichen Erzeugungskapazitäten. Der Ausstieg aus der Kohlestromerzeugung beeinflusst auch die technologische Entwicklung des Energiesystems und die ökonomisch-sozialen Effekte der Energiewende.

Aus technologischer Sicht wirkt sich die Entwicklung der Erzeugungskapazitäten und -mengen auf den Flexibilitätsbedarf des Stromsystems aus. Kohlekraftwerke sind, da sie als Grundlastkraftwerke konzipiert sind, in ihrer Betriebsweise relativ unflexibel (z.B. im Vergleich zu Gaskraftwerken). Vor dem Hintergrund des steigenden Flexibilitätsbedarfs des Energiesystems verursacht durch die steigende fluktuierende Erzeugung aus erneuerbaren Energien (siehe Kapitel Flexibilitätsbedarf und ausgeglichener vs. fokussierter Flexibilitätenmix), steht ein langfristiger Weiterbetrieb von Kohlekraftwerken somit nicht nur im Gegensatz zu einer Dekarbonisierungsstrategie, sondern auch im Gegensatz zu den Anforderungen an ein flexibles auf erneuerbaren Energien ausgerichtetes Energiesystem. Bei den aktuellen EE-Anteilen können jedoch auch Kohlekraftwerke eine wichtige Rolle spielen, um Flexibilität bereitzustellen.

In Hinblick auf die sozialen Effekte der Energiesystemtransformation ist die Kohlestromversorgung von besonderer Bedeutung für die ökonomische Struktur der energiewirtschaftlichen Wertschöpfung. Zum einen ist die Braunkohleerzeugung unmittelbar mit dem Wirtschaftszweig des Tagebaus verbunden und zum anderen sind die ökonomische Wertschöpfung und die damit verbundenen Arbeitsplätze geografisch stark konzentriert (z.B. Lausitz). Eine Reduktion der Kohlestromerzeugung ist daher unweigerlich mit negativen regionalökonomischen Auswirkungen, insbesondere Arbeitsplatzverlusten,

---

<sup>2</sup> Es ist vorstellbar, dass auch unter Klimaschutzaspekten durch die Anwendung der Carbon-Capture-and-Storage-Technik in großen Maßstab die Kohlestromerzeugung in Deutschland mittel- und langfristig fortbestehen kann. Dieser Entwicklungsoption wird aufgrund der Unwahrscheinlichkeit dieses technologischen Entwicklungspfades (siehe CCS Kapitel) in diesem Kapitel jedoch nicht weiter betrachtet.

verbunden. Zur Verringerung negativer sozialer Effekte kann daher ein politisch gestalteter Strukturwandel in den betroffenen Regionen angestoßen werden und die Übergangsprozesse sozialverträglich zu gestalten.

Während nationale politische Instrumente und Maßnahmen wesentlichen Einfluss auf die Entwicklung der Kohlestromezeugung in Deutschland haben, können marktwirtschaftliche Entwicklungen und politische Entscheidungsprozesse auf europäischer Ebene die Kohlestromezeugung ebenfalls signifikant beeinflussen. Hierzu zählt insbesondere die Entwicklung des europäischen Emissionshandelsystems bzw. die damit verbundenen CO<sub>2</sub>-Preise und weitere politische Vorgaben (z.B. Regulierungsrahmen eines potentiellen zukünftigen Kapazitätsmarktes).

## **Beschreibung der Ausgestaltungsmöglichkeiten**

Wie oben dargestellt, ist ein Ausstieg aus der Kohlestromezeugung mittel- oder langfristig notwendig, um die gesteckten Klimaschutzziele und eine Dekarbonisierung der Energieversorgung zu erreichen. Die relevanten möglichen Ausgestaltungsoptionen betreffen somit nicht die Veränderung der Kohlestromezeugung (z.B. Reduktion auf 20% Kohlestromezeugung, Ausstieg ausschließlich aus der Braunkohlestromezeugung bei Erhalt der Steinkohleerzeugung), sondern die Schnelligkeit und die Art des Ausstiegs aus der gesamten Kohlestromezeugung. Zur Diskussion der Konsequenzen der verschiedenen Entwicklungsoptionen wird vereinfacht zwischen den folgenden drei Optionen unterschieden:

### *Kurzfristiger und schneller Kohleausstieg bis ca. 2025*

Bei einem zügigen Ausstieg aus der Kohleverstromung wird eine starke Reduktion von CO<sub>2</sub>-Emissionen im Stromsektor sehr schnell erreicht. Dieser Entwicklungspfad wird unter anderem für das Einhalten der Ziele des Pariser Klimaschutzabkommens mit einer Begrenzung der Erderwärmung auf 2° als notwendig erachtet (Wehnert et al., 2017). Während zunächst die ältesten und emissionsintensivsten Braunkohlekraftwerke stillgelegt werden, müssen für diesen Entwicklungspfad auch modernere Steinkohlekraftwerke bereits vor Ende ihres Abschreibungszeitraums die Produktion einstellen. Die Geschwindigkeit dieses Ausstiegspfads orientiert sich dabei an den technischen-energiewirtschaftlichen Machbarkeitsgrenzen, d.h. die Kohleverstromung wird so stark wie möglich reduziert, ohne die Versorgungssicherheit zu gefährden und es die Möglichkeiten zum Ersatz mit anderen Erzeugungskapazitäten (EE- und Gaskraftwerks-Neubau, Importe) erlauben.

In einem solchen Entwicklungspfad würden zusätzliche Erzeugungskapazitäten, die über dem derzeitigen Zielniveau des EEG liegen, notwendig, um den Wegfall der fossilen Erzeugungskapazitäten zu kompensieren. In Folge einer solch schnellen Reduktion würden zudem zusätzliche flexible Erzeugungskapazitäten notwendig, um die Versorgungssicherheit auf gleichem Niveau aufrecht zu erhalten (Matthes et al., 2017). Hierdurch würden zusätzliche Kosten, z.B. für Investitionen in neue Gaskraftwerke, entstehen. Dieses Szenario würde daher gesamtwirtschaftlich höhere Kosten und auch höhere Strompreise zur Folge haben (Matthes et al., 2017). Darüber hinaus würde ein solcher Entwicklungspfad relativ wenig Zeit zur Gestaltung eines Strukturwandels in den von dem Kohleausstieg negativ betroffenen Regionen beinhalten.

### *Mittelfristiger und gradueller Kohleausstieg Kohleverstromung bis ca. 2035*

Dieser Entwicklungspfad stellt ein mittleres Ambitionsniveau bzgl. der CO<sub>2</sub>-Reduktionen im Stromsektor dar und ist insbesondere abgeleitet durch die Einhaltung von regulatorischen Grenzen (z.B. max. Begrenzung der Anlagenlaufzeiten auf 20-30 Jahre). Die aus Klimaschutzperspektive notwendigen Emissionsminderungen können auch dann noch erreicht werden, wenn ein gradueller Ausstieg aus der Kohlestromezeugung bis 2035 erfolgt. In einem solchen Entwicklungspfad würden ebenfalls zusätzliche Erzeugungskapazitäten, die über dem derzeitigen Zielniveau des EEG liegen, notwendig, um den Wegfall der fossilen Erzeugungskapazitäten zu kompensieren. Eine Investition in zusätzliche flexible Gaskraftwerke, welche nicht für ihren vollen Abschreibungszeitraum benötigt werden, wären jedoch nicht erforderlich (Matthes et al., 2017). Die Gestaltung des Strukturwandels zur Begrenzung der negativen sozialen und regionalökonomischen Effekte bliebe mehr Zeit als bei einem Entwicklungspfad mit einem raschen Kohleausstieg bis 2025. Aber auch in diesem Entwicklungspfad ist das Ergreifen von politischen Maßnahmen notwendig, um starke negative regionalökonomische Effekte zu vermeiden.

### *Später Kohleausstieg nach 2040*

Der Entwicklungspfad eines späten Kohleausstiegs nach 2040 stellt ein Szenario dar, in dem keine spezifischen politischen Maßnahmen getroffen werden, um eine beschleunigte Reduktion der Kohleverstromung in Deutschland zu bewirken (z.B. Referenzszenario in Bernath et al., 2017b). Somit besteht auch nach 2040 noch eine Kapazität von ca. 20 GW an Kohlekraftwerken zur Verfügung. Die Entwicklung der Kohleverstromung wird in diesem Szenario überwiegend von den CO<sub>2</sub>-Preisen im ETS beeinflusst. Die Wertschöpfungskette in der Kohle- und angrenzenden Industrien bleiben mittelfristig erhalten. Aus diesem Grund entstehen die negativen regionalökonomischen Effekte im Vergleich zu beiden beschleunigten Kohleausstiegspfaden nur sehr graduell und zu einem deutlich späteren Zeitpunkt. Die Effekte auf die Systemkosten (Kapital bzw. Investitionskosten + Grenzkosten) würden relativ gering ausfallen, da die in den Ausstiegspfaden beschriebenen zusätzlichen Kapazitäten zur Sicherstellung der Versorgungssicherheit nicht notwendig wären. Aus ökologischer Perspektive würden die deutschen Klimaziele im Stromsektor nicht erreicht und es würde hierdurch ein sehr hoher Druck auf die anderen Sektoren bzgl. der Emissionsminderungsanforderungen entstehen. Gleichzeitig würde durch die hohen durchschnittlichen Emissionen bei der Stromerzeugung das Potential für Emissionsenkungen durch Sektorkopplungsstrategien stark gesenkt.

## **Gegenüberstellung der Ausgestaltungsmöglichkeiten**

Von den oben genannten drei möglichen Entwicklungspfaden für die Kohlestromerzeugung grenzt sich der „späte Kohleausstieg“ von den anderen beiden Entwicklungspfaden durch das Nicht-Erreichen der deutschen Klimaschutzziele besonders ab. Somit kann dieser Entwicklungspfad als unvereinbar mit der angestrebten Transformation des Stromsektors betrachtet werden. Aus umweltpolitischer Perspektive kommt daher nur eine aktive politische Gestaltung der beschleunigten Reduktion der Kohleverstromung im Sinne der beiden anderen Entwicklungspfade in Frage.

Mehrere Kohleausstiegs-Szenarien wurden bereits in wissenschaftlichen Untersuchungen detailliert analysiert und legen die Notwendigkeit aus Klimaschutzperspektive und die energiewirtschaftlichen Implikationen dar (Agora Energiewende, 2016b; Hermann et al., 2017; Matthes et al., 2017).

Die Substitution von Erzeugung aus alten abgeschriebenen Kraftwerken durch Erzeugung aus moderneren Kohlekraftwerken, anderen fossilen Kraftwerken mit höheren Grenzkosten und auch durch Investitionen in zusätzliche erneuerbare Kapazitäten führen zu steigenden Strompreise bzw. Systemkosten. Der gewählte Ausstiegspfad, aber auch die Wahl der entsprechenden politischen Instrumente, wirken sich somit auch auf die Preisentwicklung im Strommarkt und die Gesamtsystemkosten aus. Die ökonomischen Effekte sind dabei stark von dem genauen Ausstiegspfad und den getroffenen Annahmen zu Preisentwicklung von erneuerbaren Energien abhängig. Bezüglich des Großhandelsstrompreises können sich für ein schnelles Ausstiegsszenario Strompreissteigerungen von ca. 20 % im Zeithorizont 2025/2030 ergeben, während sich bei einem moderaten Ausstiegsszenario keine relevanten Preissteigerungen am Strommarkt zeigen könnten (Matthes et al., 2017). Wichtig ist hier, dass ein verstärkter Ausbau erneuerbarer Energien langfristig aufgrund der kurzfristigen Grenzkosten nahe null zu einem Absinken des Großhandelsstrompreises führt. Jedoch entstehen hierdurch zusätzliche Investitionskosten, die ebenfalls von den Stromverbrauchern getragen werden müssen (insbesondere über die EEG-Umlage). Somit steigen bei einem stärkeren EE-Ausbau die Gesamtsystemkosten der Stromerzeugung an.. In Abhängigkeit vom Kohleausstiegspfad und einem damit verbundenen Ausbau der erneuerbaren Energien kann sich eine Steigerung der Systemkosten in Höhe von 3-10 €/MWh in 2025 und von 13-16 €/MWh in 2040 ergeben (Matthes et al., 2017).

Bezüglich der Umsetzbarkeit eines sehr schnellen Ausstiegsszenarios ist wichtig zu beachten, dass es hier zu erheblichen Herausforderungen im Bereich der überregionalen Versorgungssicherheit kommen kann. Grund hierfür ist, dass in sehr kurzer Zeit alternative Optionen zur Deckung aller denkbaren Last- und Erzeugungskonstellationen erschlossen werden müssten. Auch wenn dies theoretisch denkbar ist, würden wahrscheinlich in der praktischen Umsetzung Probleme bzgl. der rechtzeitigen Anpassung des regulativen Rahmens und der erforderlichen Anpassungsgeschwindigkeit seitens der Marktakteure auftreten.

Neben den energiewirtschaftlichen Aspekten wurden auch die Implikationen eines Kohleausstiegs für den Arbeitsmarkt in verschiedenen Studien untersucht (SRU, 2017, Kap. 3.2.1). Auch wenn die größten Arbeitsplatzverluste aufgrund des Ausstiegs aus der Steinkohleförderung bereits in den vergangenen Jahrzehnten erfolgt sind, sind derzeit immer noch ca. 11-15.000 Menschen in der Steinkohleindustrie und 17.700 Menschen in der Braunkohleindustrie beschäftigt (SRU, 2017). Hinzukommen weitere indirekte Arbeitsplätze für Wartung sowie vor- und nachgelagerten Produktionsketten. Für die

Bewertung der sozialen Effekte ist die Altersstruktur der Beschäftigten relevant. Derzeit sind zwei Drittel der direkt in der Braunkohlewirtschaft beschäftigten ArbeitnehmerInnen älter als 46 Jahre. Dies bedeutet, dass ein Großteil der Beschäftigten nach 2030 im Renten- oder Frühverrentungsalter sind. Der SRU schätzt, dass nur für ein Viertel der derzeit Beschäftigten der Braunkohlewirtschaft neue Arbeitsplatzperspektiven geschaffen werden müssen (SRU, 2017). Die Beschäftigungsstruktur in der Steinkohleindustrie weist große Ähnlichkeiten aus, wobei sich die Kraftwerke im Gegensatz zu den Braunkohlerevieren auf mehrere Regionen verteilen.

In Deutschland hat es in den vergangenen Jahrzehnten zahlreiche wirtschaftliche Umstrukturierungen und ökonomische Wandlungsprozesse mit deutlich größeren Arbeitsplatzeffekten gegeben (z.B. Textilindustrie, Stahlindustrie) (SRU, 2017). Zudem bestehen Erfahrungen mit der politischen Gestaltung von aktiver Strukturentwicklung mit verschiedenen Instrumenten (regionale Wirtschaftsförderung, Sozialpläne, aktive Arbeitsmarktpolitik, Umschulungs- und Qualifizierungsmaßnahmen). Vor dem Hintergrund erscheint der zu gestaltende Wandel, insbesondere bei einem mittelfristigen Kohleausstieg bis 2035, industrie- und sozialpolitisch machbar.

## Stakeholder-Positionen

Vor dem Hintergrund der Notwendigkeit eines beschleunigten Ausstiegs aus der Kohlestromezeugung, um die gesteckten Klimaschutzziele zu erreichen, ist das Thema auch von Umweltverbänden in den letzten Jahren verstärkt in die politische Diskussion eingebracht worden. Besonderer Schwerpunkt wird dabei auf die zeitnahe Beendigung der Braunkohleverstromung gelegt, da diese im Vergleich zur Steinkohle eine deutlich schlechtere Klimabilanz aufweist. Wesentliches Element der diskutierten „Fahrpläne“ für den Kohleausstieg ist der Zeitpunkt bis wann die Kohlestromezeugung in Deutschland vollständig eingestellt wird.

Bereits 2014 hat der BUND einen vollständigen Ausstieg aus der Kohlestromezeugung bis 2030 gefordert (BUND, 2014) und folgt damit eher einem schnellen Kohleausstieg im Sinne des ersten oben dargestellten Entwicklungspfades. Der WWF fordert einen sukzessiven Ausstieg in Sinne des dargestellten zweiten Entwicklungspfades, bei dem ab 2019 mit einem beschleunigten Kohleausstieg begonnen werden soll und bis 2035 die Kohleverstromung auf null zurückgeht (WWF, 2017). Der NABU hat sich auf kein Ausstiegsjahr festgelegt, sondern fordert eine Kombination aus einem Dialogverfahren zum Kohlekonsens und einem gesetzlich geregelten Kohleausstiegsplan (NABU, 2017). Im so genannten Erkelenzer Appell fordern verschiedenste (regionale-) Verbände, Umweltorganisationen aber auch kirchliche Institutionen bis 2025 mindestens die Hälfte der Kohlekraftwerksleistung vom Netz zu nehmen und keine neuen Tagebaue mehr aufzuschließen (*Erkelenzer Appell für eine Energieversorgung ohne Braunkohle*, 2016).

Der Bundesverband Braunkohle beurteilt die Braunkohlestromezeugung auch langfristig als unverzichtbar für die sichere und kosteneffiziente Stromversorgung in Deutschland (DEBRIV, 2018). Es wird dabei argumentiert, dass Deutschland seine Klimaziele auch bei einem langfristigen Beibehalten der Kohlestromezeugung erreichen kann. Zudem ist die Braunkohle ein unverzichtbarer Partner der erneuerbaren Energien, da sie Versorgungssicherheit in Zeiten mit geringer erneuerbaren Einspeisung („dunkle Flaute“) gewährleistet (DEBRIV, 2017). Die Industriegewerkschaft Bergbau, Chemie, Energie (IG BCE) spricht sich ebenfalls gegen einen forcierten Ausstieg aus der Kohlestromezeugung aus. Sie betont dabei die Bedeutung der Kohlestromezeugung für die regionale Wertschöpfung und die Notwendigkeit für einen sozialverträglichen Strukturwandel. Eine Reduktion und ein langfristiges Auslaufen aus der Kohlestromezeugung ergibt sich laut IG BCE auch automatisch aufgrund der europäischen Emissionshandels (IG BCE, 2018).

Von Seiten der Wirtschaft haben sich 2016 zahlreiche große (deutsche) Unternehmen (u.a. DB, Telekom, otto group, Puma) in einer gemeinsamen Unternehmenserklärung ebenfalls zum Kohleausstieg positioniert (Stiftung 2°, 2016). Auch wenn kein explizites Ausstiegsdatum genannt wird, so wird sich klar zu den Klimazielen von Paris und dem oberen Rand des Zielkorridors der deutschen Klimapolitik (Reduktion der Treibhausgasemissionen um 95% bis 2050) bekannt. Zudem wird ein Dialog über einen Kohlekonsens explizit gefordert um Investitionssicherheit zu schaffen.

Auf der Seite der Wissenschaft hat sich der Sachverständigenrat für Umweltfragen 2017 in einem Gutachten für eine sukzessive Stilllegung der deutschen Kohlekraftwerke ausgesprochen. Demnach sollen kurzfristig bis 2020 die ältesten und CO<sub>2</sub>-intensivsten Kohlekraftwerke stillgelegt werden und im Laufe der 2030er-Jahre die verbleibenden Kraftwerke sukzessive geschlossen werde (SRU, 2017).

Der konkrete Ausstiegspfad solle dabei auf Grundlage der Einhaltung eines spezifischen Emissionsbudgets von einer einzusetzenden Kohle-Kommission entschieden werden.

Von den politischen Parteien haben sich die B90/Die Grünen 2017 in einem Fraktionsbeschluss auf einen Kohleausstieg bis 2037 festgelegt, wobei die 20 schmutzigsten Kohlekraftwerksblöcke sofort vom Netz genommen werden sollen. Die Linke hat bereits 2016 einem Antrag im Bundestag eingebracht, nach dem die Kohleverstromung bis 2035 auslaufen soll (Bundestag, 2016).

*Kraft-Wärme-Kopplung auf Basis fossiler Brennstoffe als kurzfristige vs. langfristige Brückentechnologie*

Tabelle 10: Übersicht der Ausgestaltungsmöglichkeiten fossiler KWK-Erzeugung (Quelle: Eigene Darstellung)

Möglichkeit	Beschreibung	Pro	Contra
Fossile KWK-Erzeugung als kurz- bis mittelfristige <b>Klimaschutz-Brückentechnologie</b> mit deutlicher Abnahme ab 2025	<ul style="list-style-type: none"> <li>· Umstieg von Braun- und Steinkohle in der fossilen Stromerzeugung auf Erdgas-KWK wird bis 2025 forciert.</li> <li>· Ab 2020 sinkende Investitionen in neue KWK-Erzeugungsanlagen.</li> <li>· Flexibilisierung der Anlagen und Anbindung an Niedertemperatur-Wärmenetze wird weiter vorangetrieben und ist ein Kernelement für neue KWK-Anlagen.</li> <li>· Fokussierung der Investitionen auf Industrieprozesse und innerstädtische Anlagen zum Erhalt und Ausbau der Wärmenetze.</li> <li>· Bis 2025 steigt fossile KWK-Erzeugung weiter an, sinkt danach stark ab, um 2050 ein sehr niedriges Niveau zu erreichen.</li> <li>· KWK-Erzeugung muss sich stark der EE-Erzeugung anpassen.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>· Gas-KWK dient dem kurzfristigen Ersatz von Kohle-Anlagen. Dadurch direkte CO<sub>2</sub>-Einsparung.</li> <li>· Abnehmender Betrieb von fossilen Kraftwerken für die ungekoppelte Erzeugung</li> <li>· Stärkere Anreize für den EE-Ausbau im Stromsektor durch geringere fossile Erzeugungsalternativen</li> <li>· Frühere Anreize für die Nutzung von EE-Optionen in der Wärmeversorgung und Gebäudedämmung</li> <li>· Innovations-Anreiz für neue Wärmenetze, die verschiedene Wärmequellen und Wärmespeicher integrieren.</li> <li>· Bau der Neu-Anlagen nur an Orten, an denen ein längerfristiger Einsatz von fossilen Brennstoffen tolerabel ist, wie Industrieprozesse und innerstädtische Bereiche (no-regret Optionen)</li> <li>· Flexible Anlagen, die an Wärmenetze angebunden sind, können auch langfristig zur De-</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>· Versorgung von Wärmenetzen mit wenig CO<sub>2</sub>-intensiver Wärmeerzeugung ist derzeit nur begrenzt möglich bzw. erfordert die Entwicklung neuer Technologien.</li> <li>· Nutzung von bestehenden Gasnetzen sinkt und Betrieb wird zunehmend unrentabler bzw. kann nicht auf allen Versorgungsstufen aufrecht gehalten werden.</li> <li>· Betrieb der bestehenden Wärmenetze kann in Gefahr geraten, obwohl deren Erhalt und Ausbau hoch relevant sind</li> </ul>

Möglichkeit	Beschreibung	Pro	Contra
Fossile KWK-Erzeugung als <b>mittelfristige Klimaschutz-Brückentechnologie</b> und mit einem verbleibenden relevanten Anteil in 2050	<ul style="list-style-type: none"> <li>· KWK-Erzeugung bleibt mittelfristig fester Bestandteil der Stromerzeugung, erreicht erst 2030/2035 ihren Höhepunkt und wird entsprechend lang weiter ausgebaut.</li> <li>· KWK-Erzeugung passt sich erst ab 2025 verstärkt flexibel der EE-Erzeugung an.</li> <li>· KWK-Erzeugung sinkt frühestens ab 2030 und wird auch 2050 noch einen kleinen, aber für die Stromerzeugung relevanten Anteil behalten.</li> </ul>	ckung der Residuallast beitragen.  <ul style="list-style-type: none"> <li>· Rel. kostengünstige Wärmebereitstellung zur Versorgung von Wärmenetzen auch mittelfristig möglich.</li> <li>· Betrieb von Wärmenetzen länger rentabel (abhängig von CO2-Preis und anderen Wärmequellen)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>· THG-Zielerreichung 2030 erschwert</li> <li>· Fossile KWK-Erzeugung kann alternative EE-Optionen im Stromsystem blockieren, wenn inflexible Technologien eingesetzt werden</li> <li>· Fossile KWK-Erzeugung blockiert technologische Entwicklungen im Wärmesystem</li> <li>· Stranded investments, da neue KWK-Anlagen nach 2030 nicht über ihre vollen möglichen Betriebsjahre betrieben werden.</li> <li>· Investitionen in alternative langfristig sinnvolle Wärme-Erzeugungsoptionen könnten verzögert werden.</li> </ul>
<b>Unsicherheit und externe Treiber</b>			
<ul style="list-style-type: none"> <li>· CO<sub>2</sub>-Preise / Emissionshandel --&gt; Hohe Preise für fossile Erzeugung würden KWK-Erzeugung mindern und Investitionsanreize reduzieren</li> <li>· Gaspreise --&gt; niedrige Gaspreise fördern die fossile KWK-Erzeugung</li> <li>· Strompreise --&gt; niedrige Strompreise aufgrund von hoher fluktuierender EE-Erzeugung reduzieren KWK-Erzeugung</li> <li>· Gesamtwirtschaftliche Entwicklung --&gt; Einfluss auf Nachfrage nach Industrieprozessen und Kapazität der Industrie emissionsarme, neue Technologien zu erproben</li> </ul>			
<b>Wechselwirkungen mit anderen Richtungsentscheidungen</b>			
<ul style="list-style-type: none"> <li>· Ambitionsniveau für Klimaschutz (KS80, KS95 etc.) --&gt; je höher das Ambitionsniveau bzw. die EE-Anteile umso weniger Potential besteht für</li> </ul>			

Möglichkeit	Beschreibung	Pro	Contra
	fossile KWK-Erzeugung		
	<ul style="list-style-type: none"> <li data-bbox="405 228 2096 252">· Geschwindigkeit des Transformationsprozesses EE-Ausbaugeschwindigkeit beeinflusst Bedarf an (flexiblen) Betrieb von KWK-Anlage</li> </ul>		
	<ul style="list-style-type: none"> <li data-bbox="405 284 2096 339">· Rolle / Entwicklungspfade der Wärmenetze --&gt; Wärmenetze brauchen günstige Wärmequellen wie fossile KWK. Die Ausgestaltung der Wärmenetze ist entscheidend für die Zukunftsfähigkeit als Sammelnetz.</li> </ul>		
	<ul style="list-style-type: none"> <li data-bbox="405 371 1462 395">· Entwicklung der Gasnetze --&gt; KWK-Erzeugung erzeugt / vergrößert Bedarf an Gasnetzen</li> </ul>		
	<ul style="list-style-type: none"> <li data-bbox="405 427 2096 483">· Klimaschutzstrategie im Wärmesektor / Wärmebedarf --&gt; Starke Gebäudedämmung / EE-Stromnutzung für Wärmeerzeugung senkt KWK-Bedarf</li> </ul>		

## Fragestellung/Problemaufriss

Der Ausbau der Kraft-Wärme-Kopplung ist eine wesentliche Klimaschutzstrategie auf europäischer und deutscher Ebene, da die KWK eine besonders energieeffiziente Nutzung aller Brennstoffe darstellt. Das *Integrierte Energie- und Klimaschutzprogramm* der Bundesregierung aus dem Jahr 2007 beinhaltet das Ziel, den KWK-Anteil an der Stromerzeugung von 12% auf 25% bis 2020 zu steigern (BReg, 2007). Aus diesem Grund sind eine Reihe spezifischer Förderinstrumente implementiert worden (u.a. KWK-Gesetz, KWK-Bonus im EEG). Im Jahr 2015 hat das BMWi in seinem Eckpunkte-Papier „Strommarkt“ dieses Ziel relativiert und bezieht es seitdem nur noch auf die thermische Stromerzeugung (BMWi, 2015). Im KWKG 2016 wird das Ziel schließlich auf eine absolute Menge der KWK-Stromerzeugung bezogen (120 TWh in 2020, 125 TWh in 2025). Es bleibt bei diesen absoluten Zahlen jedoch offen, ob die mit der Fermenterwärme verbundene Stromerzeugung von Biogasanlagen einbezogen wird oder nicht. Diese beträgt im Jahr 2016 6 TWh. Das gesteckte Ziel soll vor allem durch die Förderung von KWK-Neuanlagen, aber seit dem KWKG 2016 auch durch die Förderung von größeren Bestandsanlagen erreicht werden.

In Hinblick auf die Dekarbonisierung des Energiesystems werden KWK-Anlagen langfristig nur mit einem vollständig oder fast vollständigen Einsatz erneuerbarer Brennstoffe (z.B. Biogas oder erneuerbare strombasierte Gase) eingesetzt werden können (Öko-Institut & Fraunhofer ISI, 2015a). Insbesondere bei anspruchsvollen Dekarbonisierungs-Zielen kann die fossile KWK als kosteneffiziente CO<sub>2</sub>-Vermeidungsoptionen kaum noch eine Rolle spielen (LBD Beratungsgesellschaft mbH, 2015). Derzeit führt KWK-Erzeugung auf Basis fossiler Brennstoffe insgesamt noch zu wesentlichen CO<sub>2</sub>-Einsparungen. Grund hierfür ist die hohe Energieeffizienz der Anlagen bei gleichzeitig derzeit noch bestehenden hohen Anteilen ungekoppelter und vor allem emissionsintensiver Strom- und Wärmeerzeugung, welche durch die KWK-Erzeugung verdrängt werden kann. Langfristig wird jedoch der Wärmebedarf aufgrund einer stärkeren Gebäudedämmung und weiterer Effizienzmaßnahmen stark abnehmen. Zugleich wird der verbleibende Wärmebedarf vermehrt durch andere Energieträger gedeckt (z.B. Wärmepumpen). Aus diesem Grund wird die fossile KWK-Erzeugung oftmals als Brückentechnologie bezeichnet (Sensfuß et al., 2017).<sup>3</sup> Mittelfristig haben erdgas-betriebene KWK-Anlagen jedoch auch weiterhin eine relevante Rolle im Energiesystem, solange ihr Einsatz ungekoppelte fossile Erzeugung ersetzt und damit zur Emissionseinsparung beiträgt. Aus diesem Grund sieht auch das BMWi für die fossile KWK-Erzeugung mittelfristig noch eine wichtige Funktion beim Klimaschutz (BMWi, 2017).

Die wissenschaftlichen Studien zu langfristigen Klimaschutzenszenarien beinhalten überwiegend eine ähnliche Entwicklung der fossilen KWK-Erzeugung. Die Erzeugung steigt zunächst weiter an und erreicht abhängig vom Szenario zwischen 2020 und 2030 ihren Höhepunkt zwischen 75-105 TWh. Danach nimmt die Erzeugung sukzessive ab und erreicht 2050 ein Niveau zwischen 5-45 TWh (Sensfuß et al., 2017). Die folgende Abbildung zeigt die Entwicklung der fossilen KWK-Stromerzeugung innerhalb verschiedener Szenarien.

---

<sup>3</sup> In wie weit oder ob KWK-Anlagen auf Basis erneuerbarer Brennstoffe in einem dekarbonisierten Energiesystem eine relevante Rolle spielen ist umstritten. Diese Entwicklungsoption ist jedoch an dieser Stelle nicht Gegenstand der Analyse.

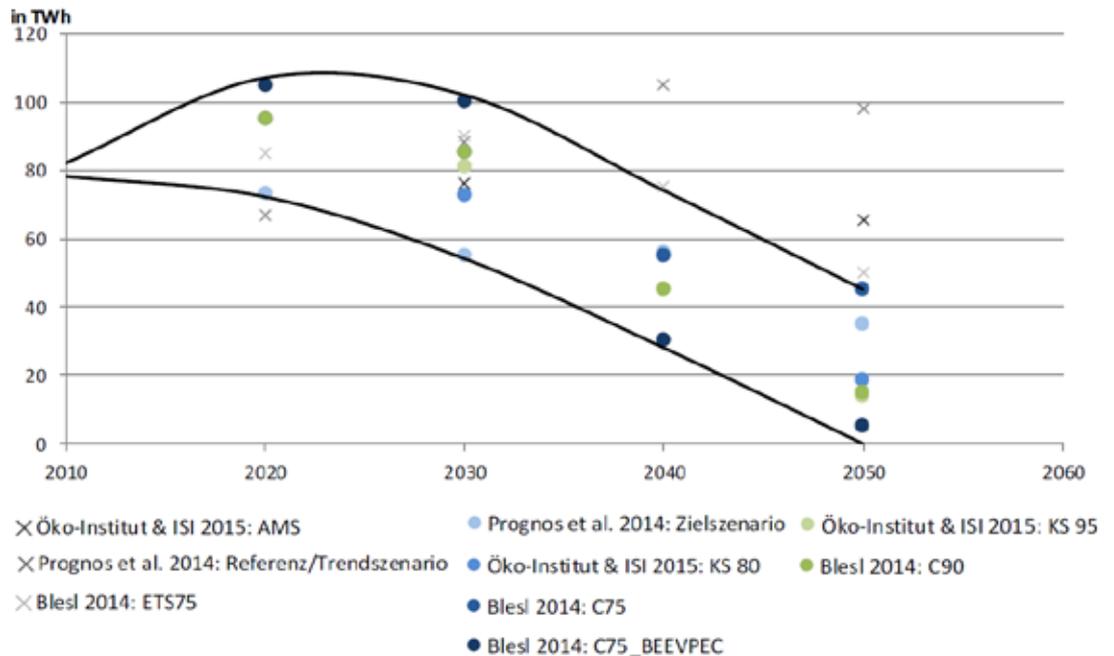


Abbildung 10: Vergleich zur Entwicklung der fossilen KWK-Stromerzeugung in verschiedenen Klimaschutzszenarien Quelle: Sensfuß et al., 2017)

Ein zentrales Problem beim Betrieb und der Förderung fossiler KWK-Anlagen ist, dass ein weiterer Ausbau entsprechender Infrastruktur zu Lock-in-Effekten führen kann. Aufgrund der Lebensdauer von KWK-Anlagen von 15 bis mehr als 40 Jahren besteht die Gefahr, dass die Anlagen aus betriebswirtschaftlichen Gründen weiterbetrieben werden, obwohl deren Betrieb aus Klimaschutzperspektive kontraproduktiv ist. Gleichzeitig kann der Einsatz (vermeintlich) klimafreundlicher KWK-Anlagen langfristig andere sinnvollere Maßnahmen wie die Gebäudedämmung oder den Einsatz Erneuerbarer Energien in der Wärmeerzeugung unattraktiver machen.

Aus einer Transformationsperspektive ist der Betrieb von fossilen KWK-Anlagen prinzipiell sinnvoll, wenn die Anlagen zu Emissionsminderungen im Strom- und im Wärmesektor beitragen. Aus diesem Grund ist eine Anpassung des Betriebs an die steigenden Anteile erneuerbarer Energien und an die steigende Energieeffizienz unerlässlich. In der Regel sind heutige KWK-Anlagen jedoch wärmeseitig ausgelegt und wärmegeführt betrieben. Hohe Benutzungsstunden erhöhen die Wirtschaftlichkeit. Dieser aus Stromsystem-Perspektive unflexible Betrieb passt langfristig nicht in ein Stromsystem, welches zunehmend von erneuerbaren Energien geprägt ist. Es ist daher eine Flexibilisierung und Modernisierung der entsprechenden Anlagen notwendig, damit die Anlagen auf die Strom-, aber auch auf die Wärmeproduktion aus erneuerbaren Energien reagieren können. Technisch ist ein solcher flexibler Betrieb, z.B. durch höhere Anlagenkapazitäten, den Einsatz von Techniken, die häufige Wechsel der Betriebszustände ermöglichen und langfristig aushalten, und ergänzende Wärmespeicher, möglich. Bezüglich der Entwicklung der fossilen KWK-Erzeugung werden im Folgenden zwei unterschiedliche Entwicklungspfade/-optionen dargestellt. Hierbei muss beachtet werden, dass in der wissenschaftlichen Literatur bzgl. der generellen Entwicklung der fossilen KWK-Erzeugung in Rahmen von Klimaschutz-Zielszenarien große Übereinstimmung besteht. Die Entwicklungsoptionen unterscheiden sich daher insbesondere in der maximalen Höhe der gesamten KWK-Erzeugung und in der Stärke der darauf folgenden Reduktion.

Zusätzlich zu den folgenden zwei Entwicklungspfaden ist ein langfristiger Fortbestand der KWK-Erzeugung mit einem Übergang zur Nutzung synthetischer Gase denkbar. Zentral hierfür ist jedoch die Frage nach der Verfügbarkeit synthetischer Brennstoffe auf Basis erneuerbarer Stromerzeugung (PtX). Die Rolle von PtX-Technologien ist in Klimaschutzszenarien sehr unterschiedlich und schwankt von einer marginalen Bedeutung bis hin zu einem zentralen Technologiepfad für den Wärme- und Verkehrssektor (siehe 3.4.1). Bei einer großen Verfügbarkeit von synthetischen Brennstoffen für die Strom- und Wärmeerzeugung würde dies einen langfristigen Weiterbetrieb von KWK-Anlagen ermöglichen, die zunächst mit fossilen Brennstoffen betrieben werden. Die zukünftige Verfügbarkeit ist jedoch mit hohen Unsicherheiten verbunden. Entweder müssten die benötigten Mengen aus dem Ausland

importiert werden und in den Exportländern entsprechende große Infrastrukturen geschaffen werden, oder die Produktion erfolgt in Deutschland. Eine inländische Produktion würde das Energiesystem stark verändern, da die Produktion aufgrund der hohen Umwandlungsverluste mit hohen Brennstoffkosten verbunden wäre und zudem die EE-Stromerzeugung/Flächenbedarf stark steigen würde (siehe auch 3.1.1). Aufgrund dieser Unsicherheiten und weitreichenden Implikationen wird bzgl. der Pfadentscheidung im Bereich der KWK-Erzeugung die Option eines langfristigen Fortbestands der KWK-Erzeugung mit einem Übergang zur Nutzung synthetischer Gase hier nicht weiter betrachtet.

## **Beschreibung der Ausgestaltungsmöglichkeiten**

### *Fossile KWK-Erzeugung als kurz- bis mittelfristige Klimaschutz-Brückentechnologie mit deutlicher Abnahme ab 2025.*

Diese Entwicklungsoption passt am besten zu Szenarien, welche eine starke Dekarbonisierung bis zum Jahr 2050 darstellen. Bis 2025 wird hierbei in der fossilen Stromerzeugung ein schneller Umstieg von Braun- und Steinkohle auf Erdgas-basierte KWK durch entsprechende politische Steuerung erreicht. Der Höhepunkt der fossilen KWK-Erzeugung wird bereits ca. 2025 erreicht. Dies bedeutet, dass die Investitionen in neue KWK-Anlagen zum Zwecke der Nutzung fossiler Brennstoffe bereits ab 2020 absinken. Gleichzeitig werden KWK-Anlagen zunehmend durch weitere Wärmequellen ergänzt (z.B. Solarthermie), welche in die Wärmenetze einspeisen. Davon unberührt wird die Flexibilisierung bestehender und neuer Anlagen stark vorangetrieben und der Betrieb passt sich durch entsprechende Anreize und Marktsignale stark an die EE-Erzeugung an. Ab ca. 2025 nimmt die absolute Höhe der Erzeugung stark ab und erreicht 2050 ein sehr niedriges Niveau. In 2050 existiert nur noch eine erdgasbasierte fossile KWK-Erzeugung, welche fast ausschließlich zur Stützung der Versorgungssicherheit innerhalb des Klimabudgets für den Strom- und Wärmesektor betrieben wird. Dazu wird der dann noch vorhandene KWK-Anlagenpark betrieben, möglichst mit emissionsarmen oder -freien Brennstoffen. Die erzeugte Wärme wird in Wärmenetze eingespeist, die als Sammelnetze fungieren und Wärmeerzeugung verschiedenster Quellen aufnehmen und speichern können.

### *Fossile KWK-Erzeugung als mittelfristige Klimaschutz-Brückentechnologie und mit einem verbleibenden relevanten Anteil in 2050*

Die fossile KWK-Erzeugung steigt durch entsprechende politische Instrumente mittelfristig stark an und erreicht ihren Höhepunkt nicht vor 2030. Abhängig vom EE-Ausbau passt sich die KWK-Erzeugung erst ab ca. 2025 verstärkt flexibel der EE-Erzeugung an. Der Umstieg von Braun- und Steinkohle auf Erdgas in der KWK-Erzeugung erfolgt schrittweise bis ca. 2035. Die KWK-Erzeugung reduziert sich nach ihrem Höhepunkt schrittweise auf ein kleines, aber für die Deckung der Stromnachfrage nicht irrelevantes Niveau. Bei einem vergleichsweise späten Hochpunkt der Erzeugung (z.B. im Jahr 2035) muss die KWK-Erzeugung in den Folgejahren vergleichsweise stark absinken, um ihr niedriges Niveau 2050 noch zu erreichen. Dieses Szenario muss genau abgeglichen werden mit den Emissionsbudgets, die für den Strom- und Wärmesektor jeweils noch innerhalb der Zielsetzung zur Verfügung stehen. Ohne eine Flexibilisierung der regelbaren Erzeugung wird der Ausbau der Erneuerbaren Energien akut behindert werden.

## **Gegenüberstellung der Ausgestaltungsmöglichkeiten**

Das Entwicklungsszenario einer fossilen KWK-Erzeugung als kurz- bis mittelfristige Brückentechnologie passt insgesamt besser zu einem zeitnahen und starken Ausbau erneuerbarer Energien in der Stromerzeugung. Größere Erzeugungsmengen fossiler KWK-Erzeugung würden alternative erneuerbare Erzeugungsoptionen blockieren, insbesondere wenn diese nicht vermehrt auf Erdgas basieren und sich flexibel der EE-Stromproduktion anpassen. Für die Zielerreichung einer Einsparung von Treibhausgasemissionen um 55% bis 2030 (ggü. 1990) sind erhebliche Emissionsreduktionen erforderlich, die ohne eine frühzeitige Abschaltung der Kohle-Anlagen und eines erheblichen Ausbaus der Erneuerbaren Energien in beiden Sektoren nicht darstellbar sein wird.

Aufgrund der technischen Restriktionen im Betrieb (notwendiger Mindestwärmebedarf, wärme-geführte Betriebsführung) stellen KWK-Anlagen nur eine begrenzt sinnvolle Option zur Deckung des Wärme- und Strombedarfs dar. Eine inflexible Fahrweise sollte in jedem Fall auf ein Minimum reduziert werden, um die notwendige Integration fluktuierender erneuerbarer Energien zu unterstützen.

Sollte bei einer mittelfristigen und zugleich vergleichsweise hohen fossilen KWK-Erzeugung auch der Betrieb von emissions-intensiven Kohle-KWK-Anlagen verlängert werden, würde dies ebenfalls konträr zu einer ambitionierten Emissionsreduzierung stehen.

Bei einer geringeren fossilen KWK-Erzeugung und einem früheren Erreichen des Erzeugungsmaximums ist der Bedarf für den EE-Ausbau im Strom- wie auch im Wärmesektor höher. Zudem steigen die Anreize für eine stärkere Gebäudedämmung und zur Nutzung erneuerbarer Wärmequellen durch die Verringerung des Angebots relativ günstiger Wärmequellen. Zeitgleich steigt der Anreiz für die Entwicklung und Implementierung von innovativen Wärmenetzen, welche verschiedene erneuerbare Wärmequellen und Wärmespeicher integrieren. In Anbetracht der derzeitigen begrenzten Möglichkeiten einer CO<sub>2</sub>-armen Wärmebereitstellung für Wärmenetze bedingt dies jedoch stärker die Entwicklung neuer Technologien. Zudem wird bei einer zeitnahen Reduktion der KWK-Erzeugung auch die Nutzungsdensität von Erdgasnetzen reduziert. Dies macht den Betrieb von Erdgasnetzen zunehmend unrentabel.

Bei einer höheren und längeren fossilen KWK-Erzeugung hingegen wäre auch mittelfristig eine vergleichsweise kostengünstige Versorgung von Wärmenetzen mit bestehenden Technologien möglich und der Betrieb bestehender Erdgasnetze wäre länger rentabel. Dies könnte den Anreiz zum stärkeren Ausbau von Erdgasnetzen erzeugen, welche dann zu einem späteren Zeitpunkt auf erneuerbare Wärmequellen umgestellt werden müssten. Entsprechende KWK-Anlagen zur Einspeisung in Fernwärmenetze sind vor allem in städtischen Ballungsräumen noch länger sinnvoll, da hier die dezentrale Wärmeerzeugung auf Basis erneuerbarer Energien (PV, Biomasse, Geothermie) derzeit wegen fehlender bekannter technologischer Optionen schwieriger ist (siehe 3.2.2). Die innerstädtischen bestehenden Wärmenetze benötigen einen erhaltenden Betrieb und einen Ausbau, um die dann zukünftig vorhandenen EE-Wärmequellen zu verteilen. Dafür kann der Betrieb und Neubau von Erdgas KWK-Anlagen noch länger sinnvoll sein. Entscheidend dabei ist aber, dass bei der Planung der Anlagen und Netze der sukzessive Zubau von EE technisch berücksichtigt wird. Das bedeutet, dass die Temperatur der Wärmenetze gesenkt werden und die Flexibilität der KWK-Anlagen technisch gegeben sein muss. Der Vergleich unterschiedlich ambitionierter Klimaschutzszenarien zeigt, dass bei anspruchsvollen Dekarbonisierungsszenarien nur sehr wenig Raum für eine fossile KWK-Erzeugung besteht. Wird auch über 2020 hinaus in neue KWK-Kapazitäten zur Nutzung fossiler Brennstoffe investiert, besteht die Gefahr von *stranded investments*. Grund hierfür ist, dass diese Anlagen aufgrund der dann notwendigen schnellen Reduktion der fossilen Erzeugung nach 2035 in Teilen nicht über ihre vollen Betriebsjahre und mit wirtschaftlich ausreichenden jährlichen Betriebsstunden betrieben werden können.

## Stakeholder-Positionen

Aufgrund der positiven Klimaschutzeffekte, die mit dem derzeitigen Einsatz von KWK-Anlagen auf Basis fossiler Brennstoffe verbunden sind, wird der Einsatz derzeit und in den nächsten Jahren von vielen Akteuren als positiv bewertet. Der Diskurs um die KWK-Technologie fokussiert sich daher stark auf die richtige Ausgestaltung von Förderinstrumenten, um die gewünschten Steigerungen der KWK-Erzeugung zu erreichen.

Der Bundesverband Kraft-Wärme-Kopplung sieht in der KWK keine Brückentechnologie, sondern eine Schlüsseltechnologie und durch die Nutzung synthetischer Gase auch eine dauerhafte Perspektive in einem dekarbonisierten Energiesystem. Er spricht sich daher für einen intensiven Ausbau gasbasierter KWK-Anlagen aus (B.KWK, 2018). Auch der Verband kommunaler Unternehmen spricht sich für einen langfristigen Erhalt der von KWK-Anlagen aus und verweist auf die Nutzung von synthetischen Gasen (Verband Kommunaler Unternehmen (VKU)). Der Verband der Gaswirtschaft (DVGW) spricht sich ebenso für eine Stärkung der KWK-Erzeugung aus, vor allem mit Blick auf die damit verbundene Erhaltung der Gasnetze (DVGW, 2016). Der VDI bewertet die Kraft-Wärme-Kopplung auf Basis fossiler Brennstoffe nicht explizit als Sackgassen- oder Brückentechnologie. Er betont jedoch, dass die KWK auch im Zeitraum 2020-2030 eine wichtige Erzeugungstechnologie zur Deckung der Residuallast und zur Bereitstellung von Flexibilität zur Netzstützung sein wird. Zudem weist er explizit auf die Möglichkeit der Umstellung auf erneuerbare strombasierte Gase und damit auf einen langfristig klimafreundlichen Betrieb hin (Gesellschaft Energietechnik, 2017).

Nur wenige Stakeholder-Gruppen beziehen konkrete Position zur mittel- und langfristigen Entwicklung der fossilen KWK-Erzeugung. Ausnahme bildet hier der DVGW, der in der KWK bei einer stromoptimierten Fahrweise das Potential sieht, auch einen wesentlichen Beitrag zur Deckung der Residuallast im Zeitrahmen bis 2050 zu leisten (DVGW, 2016). Auch wenn hier auf die Nutzung von Biomethan als

Brennstoff verwiesen wird, wird eine Nutzung von fossilem Erdgas nicht explizit ausgeschlossen. BDEW und AGFW sehen auf Basis einer von ihnen beauftragten Studie (Prognos, 2013) auch ein Potential für die fossile KWK-Erzeugung im Zeitraum 2030-2050, wobei von einem EE-Anteil von 80% im Jahr 2050, also einem nicht ambitionierten Klimaschutz, ausgegangen wird (BDEW & AGFW, 2013).

### *Konventionelles Erdgas vs. Gasnetz als Langzeitspeicher*

#### **Fragstellung Problemaufriss**

Für das zukünftige Energiesystem stellt sich die Frage, welche Rolle der Energieträger Gas und die Gasinfrastruktur spielen. Verschiedene Entwicklungen sind dabei denkbar. Dabei stehen sich eine gleichbleibende, abnehmende und eine steigende Wichtigkeit des Gasnetzes gegenüber. Eine abnehmende Relevanz der Stromerzeugung aus konventionellem Erdgas ergibt sich insbesondere dann, wenn sehr ambitionierte Emissionsreduktionsziele angestrebt werden (siehe Kapitel Hoher vs. geringer Anteil erneuerbarer Energien im Stromsektor). Ebenso könnte die zugrundeliegende Kraftwerks- und Netzinfrastruktur relevant bleiben, nämlich dann, wenn die Synthese von Methan eine zentrale Rolle im Energiesystem einnimmt und/oder eine Restmenge an Emissionen zur Integration von erneuerbarer Erzeugung zugelassen wird. Unabhängig vom zukünftigen Bedarf ist die heutige Gasinfrastruktur für eine Vielzahl an Szenarien gerüstet (ECF et al., 2016), die zukünftige Entwicklung des Netzes hängt daher besonders von der angestrebten Entwicklung dieses Sektors ab.

*Tabelle 11: Mögliche zukünftige Rolle der Gasnetze (Quelle: Eigene Darstellung)*

<b>Möglichkeit</b>	<b>Beschreibung</b>	<b>Pro</b>	<b>Contra</b>
Gaskraftwerke zum saisonalen Ausgleich von erneuerbarer Erzeugung bzw. zur Überbrückung von „dunklen Flauten“ mit synthetisch erzeugtem Methan	· Emissionsfreie Stromerzeugung durch die Nutzung von synthetisch erzeugtem Methan in Wintermonaten.	· Erneuerbare Erzeugung kann vom Dargebot erneuerbarer Energien entkoppelt werden.	· Hohe Effizienzverluste bei der Synthese und Rückverstromung von EE-Gas · Hohe Kapazität an Erdgaskraftwerken wird benötigt.
Gasnetz/Gasspeicher als saisonaler Energiespeicher	· Saisonale Speicherung von erneuerbaren Überschüssen durch Methansynthese	· Versorgung mit EE-Gas während dunkler Flauten und im Winter	· Reines CO <sub>2</sub> zur Methanisierung benötigt.
Gaskraftwerke zur Integration erneuerbarer Energien	· Ausgleich fluktuierender Erzeugung durch flexible Gaserzeugung	· Vergleichmäßigung von Erzeugung, Nutzung bereits vorhandener Infrastruktur	· Ggf. Pfadentscheidung für konventionelle Flexibilitäts-technologien
Gasnetze als Voraussetzung für die Nutzung effizienter Gaskraftwerke	· Ausgleich durch effiziente Erzeuger mit niedrigen Emissionen	· EE-Integration durch relativ flexible Gaskraftwerke mit niedrigen Investitionskosten	· Abhängigkeit von Energieflüssen aus dem Ausland · Sind die verbleibenden Mengen ausreichend für den Weiterbetrieb der Gasinfrastruktur?

Gaskraftwerke werden nicht mehr genutzt	Gaskraftwerke werden nicht mehr genutzt. Notwendige Erzeugung wird durch alternative Technologien bereitgestellt	Neue Flexibilitätsoptionen und Speicher können zum Einsatz kommen. Lock-In Effekte werden vermieden.	Flexibilität von Gaskraftwerken kann nicht genutzt werden. Unsicherheit über die Potenziale von Alternativen
Gasnetze werden nicht mehr benötigt	Die Gasnetze werden rückgebaut. Gas wird nicht mehr genutzt, zumindest nicht über eine entsprechende Infrastruktur.	Emissionen des fossilen Erdgas-transporten werden vermieden.	Unsicherheit über den zukünftigen Bedarf an Gas

---

### Unsicherheiten und externe Treiber

---

- Zukünftige Technologieentwicklung, Entwicklung von alternativen Flexibilitäten
- Sehr große EE-Strommengen für PtX notwendig, unklare Entwicklung beim Ausbau
- Lieferengpässe, Erreichen der Klimaziele
- Gasnetze stellen eine Konkurrenz zu Wärmenetzen dar. Findet eine Nutzung von Gasheizungen statt, so wird keine Investition in ein Wärmenetz vorgenommen.

---

### Wechselwirkungen mit anderen Richtungsentscheidungen

---

- Flexibilitätsbedarf und ausgeglichener vs. fokussierter Flexibilitätenmix
  - Kraft-Wärme-Kopplung auf Basis fossiler Brennstoffe
  - Verstärkt Effizienz/Dämmen vs. verstärkt erneuerbare Energien
  - Verbot neuer fossiler Heizungen ab 2030 vs. Technologieoffenheit
  - Sektorkopplung Elektrifizierung vs. synthetische Brennstoffe
- 

### Beschreibung der Ausgestaltungsmöglichkeiten

#### *Gaskraftwerke zur Integration erneuerbarer Energien*

Im Rahmen des fortschreitenden Ausbaus erneuerbarer Energien werden verschiedene Herausforderungen auftreten, bei deren Bewältigung Gaskraftwerke eine Rolle spielen können (Greenpeace, 2010). Besonders da Erdgasnetze eine vorhandene Infrastruktur darstellen, die im weiteren Verlauf der Energiewende Verwendung finden kann (Bruns et al., 2012). Gaskraftwerke können zur Integration erneuerbarer Erzeugung dienen: Während Flauten kann die Erzeugung von Gaskraftwerke das Defizit erneuerbarer Erzeugung ausgleichen. Für eine solche Nutzung von Gaskraftwerken ist jedoch das Gasnetz als Infrastruktur notwendig. Eine weitergehende Nutzung des Gasnetzes unterstreicht auch der Netzentwicklungsplan Gas gegenüber, der einen Ausbau der Infrastruktur empfiehlt (Fernleitungsnetzbetreiber, 2015).

Besonders da Gaskraftwerke eine hohe Effizienz aufweisen, die durch die gekoppelte Nutzung von Strom und Wärme weiter erhöht werden kann, eignen sie sich für eine emissionsarme Integration erneuerbarer Energien. Dies weist besonders Vorteile im Vergleich zur Nutzung anderer fossiler Energieträger auf, wie Kohle oder Öl, die trotz einer Nutzung von Kraft-Wärme-Kopplung nicht die Effizienz von Gaskraftwerken erreichen. Bis 2040 stellen sie daher eine günstige Möglichkeit der Emissionsreduktion dar (enervis energy advisors GmbH, 2017).

#### *Gasnetze werden nicht mehr genutzt*

Eine absehbare Entwicklung ist die Reduktion fossiler Energieträger, um Emissionen zu verringern und Emissionsziele Deutschlands zu erreichen. Szenarien hierzu sind beispielsweise in der Studie Klimaschutzszenario 2050 von (Öko-Institut & Fraunhofer ISI, 2015b) zu finden. Aus diesen Szenarien geht eine abnehmende Bedeutung der Gasnetze hervor. Ein Rückbau des Netzes ist allerdings heute denkbar: „*Der Nachfragerückgang, die Flexibilisierung und auch die Gasqualitätserfordernisse machen es in der Zukunft u. U. unvermeidlich, dass es sogar in bestimmten Bereichen zu einem Rückbau nicht mehr notwendiger technischer Anlagen kommen kann, [...]*“ (Gaspool, 2011). Eine zeitnahe Reduktion der konventionellen Erzeugung, würde einen Rückbau der Netze forcieren. Die Flexibilität der Gaskraftwerke wird in diesem Fall durch andere Flexibilitätsoptionen (bspw. das Netz oder Speichertechnologien) bereitgestellt. Ein solcher technologischer Pfad bringt jedoch einen Lock-In Effekt mit sich: Wird der Gassektor und Infrastruktur zurückgebaut so wird eine Nutzung dieser Infrastruktur für die Zukunft ausgeschlossen, da der Aufwand eines Wiederaufbaus zu enorm ist. Sollten Gaskraftwerke zukünftig wieder an Relevanz gewinnen wäre ein Wiederanstieg mit großen Hindernissen verbunden.

### *Gaskraftwerke zum saisonalen Ausgleich mit synthetisch erzeugtem Methan*

Dem gegenüber steht die Nutzung von synthetisch erzeugtem Wasserstoff oder Methan, um saisonale Unterschiede in der Stromerzeugung erneuerbarer Energien auszugleichen. Erneuerbares Methan kann einerseits aus der Vergärung von Biomasse oder durch die Elektrolyse von Wasserstoff und anschließender Methanisierung unter Verwendung von CO<sub>2</sub> gewonnen werden<sup>4</sup>. Dieses Gas kann schließlich als emissionsfreier saisonaler Speicher erneuerbaren Stroms und zur Substitution von fossilen Energieträgern im Strom-, Wärme- und Transportsektor Einsatz finden (BMW i & dena, 2013). Verschiedene Untersuchungen betonen daher die zukünftige Rolle von erneuerbarem Methan und der damit verbundenen Infrastruktur (enervis energy advisors GmbH, 2017; Frontier Economics et al., 2017). Es ist jedoch zu berücksichtigen, dass eine intensive Nutzung und Ausrichtung des Systems auf diese Technologie dazu führen kann, dass alternative Technologien nicht genutzt würden, auch wenn eine wirtschaftliche Nutzung möglich wäre.

Die Rolle der Erdgasnetze könnte so in Zukunft relevant bleiben. Es ist jedoch zu beachten, dass für die Synthese von Methan Voraussetzungen zu erfüllen sind: Um eine emissionsfreie Synthese zu realisieren, ist es notwendig, eine direkte Verbindung zwischen erneuerbarer Erzeugung und Synthese herzustellen, da die Verwendung eines Strommixes mit Anteilen fossiler Erzeugung eine geringe Effizienz aufweist und dazu führt, dass die Nutzung von synthetischem Methan nicht länger emissionsfrei ist. Neben erneuerbarem Strom wird eine ausreichende CO<sub>2</sub>-Quelle benötigt. Diese kann etwa aus Biogasanlagen stammen oder der Luft direkt entzogen werden. Besonders der Entzug aus der Luft ist mit einem hohen Energiebedarf verbunden. Bei der großskaligen Erzeugung von Methan kann dieser Bedarf daher stark ansteigen und muss ebenso durch erneuerbare Energien bereitgestellt werden (Fraunhofer IFAM, 2014).

Auch für die Nutzung erneuerbaren Gases gibt es unterschiedliche Szenarien. Die ermittelten Strombedarfe für die Synthese von Erdgas durch Elektrolyse und anschließende Methanisierung unterscheiden sich allerdings erheblich. In der folgenden Abbildung ist eine Übersicht zu sehen. Der höchste ermittelte Wert liegt hier bei 300 TWh in einer Energieversorgung im Jahr 2050, die eine 100%ige Versorgung mit erneuerbaren Energien realisiert. Eine 80%ige Versorgung der Energieversorgung durch erneuerbare Energien ist hingegen auch ohne eine Nutzung von erneuerbarem Gas denkbar (vgl. Klimaschutzszenario 80 aus Öko-Institut und Fraunhofer ISI (2015a)).

---

<sup>4</sup> Ein emissionsfreier Energieträger trägt durch seine Nutzung nicht zur Erhöhung der Treibhausgasemissionen bei. Dies ist dann der Fall wenn verwendetes CO<sub>2</sub> zur Methansynthese dem System entzogen wurde.

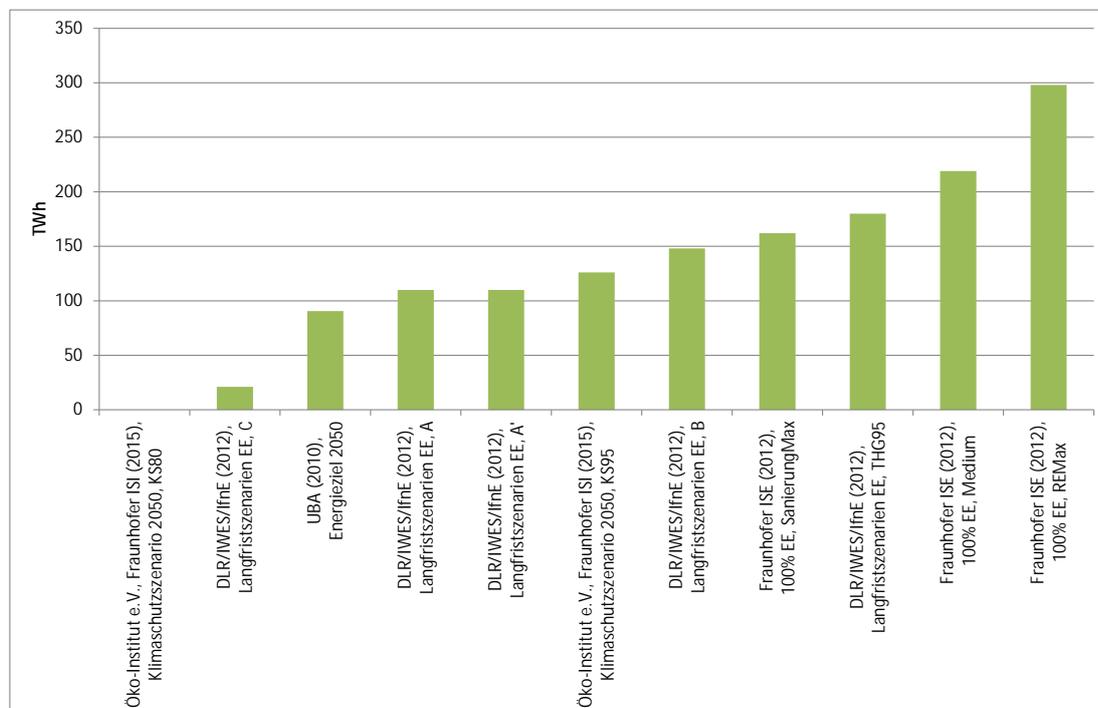


Abbildung 11: Übersicht über den Strombedarf für die Elektrolyse und Methanisierung erneuerbarer Energieträger im Jahr 2050 (Quelle: Eigene Darstellung basierend auf (DLR et al. 2012; Fraunhofer ISE 2012, 2012; Öko-Institut e.V. & Fraunhofer ISI 2015b; UBA 2010))

## Gegenüberstellung der Ausgestaltungsmöglichkeiten

Unterschiedliche Szenarien sind für die zukünftige Nutzung der Gasinfrastruktur denkbar. Neben einem vollständigen Rückbau der Infrastruktur stehen dem eine Nutzung zur Integration erneuerbarer Energien und eine intensive Nutzung vor dem Hintergrund der synthetischen Erzeugung von Erdgas gegenüber. Besonders einem schnellen Ausstieg aus der Nutzung fossiler Energieträger folgt ein Rückbau und Ausschluss weiterer Nutzung der Erdgasinfrastruktur. Eine Konzentration auf eine Nutzung von synthetischen Energieträgern führt hingegen zu einer hohen Ausrichtung auf diese Technologie. Alternative Flexibilitätstechnologien können in einem Wettbewerb mit dieser vorrangig genutzten Technologie benachteiligt werden.

Fokussiert eine Nutzung von Erdgasnetzen und –kraftwerken auf die Integration erneuerbarer Energien wird die Nutzung der Infrastruktur reduziert. Einen zukünftigen Anstieg oder eine Abnahme der Nutzung schließt dies jedoch nicht aus. Eine moderate Nutzung der Technologie könnte so zu einem technologieoffenen Pfad führen, der einen Wettbewerb zwischen den Flexibilitätsoptionen zulässt und gleichzeitig einen Fokus oder einen Ausstieg aus der Nutzung der Erdgasinfrastruktur nicht ausschließt.

Daraus ergibt sich die Frage, ob auch bei einem Rückbau die notwendige Infrastruktur für eine Nutzung von Erdgas zukünftig bestehen bleibt. Diesen Bedenken steht der aktuelle Netzentwicklungsplan Gas gegenüber, der einen Ausbau der Infrastruktur empfiehlt (Fernleitungsnetzbetreiber, 2015).

## Stakeholder-Positionen

Die Rolle, die Erdgas im zukünftigen Energiesystem spielen wird, wird unterschiedlich bewertet. Der Bund für Umwelt und Naturschutz Deutschland (BUND) äußert Bedenken bei der Nutzung von Erdgas (BUND, 2011). Gründe hierfür seien die Importabhängigkeit Deutschlands von Energielieferungen aus Ländern, die zum Teil in „geopolitisch unsicheren Regionen“ liegen sowie die mit der Förderung verbundenen Schäden für Natur und Umwelt, wie der Klimawandel. (Weis, 2015) betont, dass Gas in keinem Fall eine emissionsarme Alternative zur Nutzung von Kohlekraft darstellt. Besonders transportbedingte Emissionen würden unterschätzt und führen zu einer Beschleunigung des Klimawandels. Ebenso würden Investitionen in Gasnetze die zukünftige Rolle der Erdgastechnologien festigen. Das Streben nach einer Reduktion der Gaspreise könnte so die Rolle von Erdgas als Konkurrent zu erneuerbaren Energien festigen.

Für den (DVGW, 2017a) stellt der Energieträger Gas eine feste Säule der Energiewende dar. Auch laut Deutschem Industrie und Handelskammertag (DIHK) soll Erdgas zur Sicherung der Versorgungssicherheit beitragen (Deutscher Industrie und Handelskammertag, 2015). So wie der BUND nennt auch der DIHK die Abhängigkeit von Energielieferungen aus dem Ausland als Risiko, das allerdings durch einen „liquiden Markt“ behoben werden kann. Erdgas wird hier nicht als Brückentechnologie verstanden, sondern als Teil des (zukünftigen) Energiesystems. Eine ähnliche Ansicht teilt der BDEW, der die Nutzung von Erdgaskraftwerken auch im zukünftigen System sieht (BDEW, 2016). In welchem Umfang synthetisches Erdgas zukünftig im Stromsystem integriert sein wird, hänge jedoch von unterschiedlichen Faktoren ab. Der BDEW betont, dass es wichtig sei, keine „Lock-out-Effekte“ einzugehen, die die Nutzung einer Technologie alternativlos machten.

Für eine Nutzung synthetischen Methans spricht sich Greenpeace energy aus. Dieser Energieträger wird als eine für das Gelingen der Energiewende notwendige Technologie angesehen (Greenpeace Energy, 2017). Prof. Michael Sterner von der Technischen Hochschule Regensburg betont, dass die Verwendung der Power-to-Gas Technologie eine Ergänzung des Technologiemixes im Rahmen der Energiewende zur Sektorkopplung darstelle (Sterner, 2014). Auch die Strategieplattform Power to Gas sieht die zukünftige Rolle dieser Technologie, besonders im Bereich der Sektorkopplung und als Langzeitspeicher im Stromsystem. Hier sei sie ein wichtiger Baustein (Strategieplattform Power to Gas, 2013).

## 3.2 WÄRMESEKTOR

Die Dekarbonisierung im Bereich der Gebäudewärme erfolgt vereinfacht gesagt über zwei Schienen: zum einen über die Reduktion des Endenergieverbrauchs für Wärme, zum anderen über die Erhöhung des Anteils an erneuerbaren Energieträgern. Im Wärmesektor ist die Dekarbonisierung bislang nur wenig vorangeschritten. Die seit Jahren geforderte Steigerung der Sanierungsrate wird trotz gut ausgestatteter Fördertöpfe nicht erreicht. Derzeit liegt sie bei um 1% - laut Expertenmeinung müsste sich diese Rate allerdings mindestens verdoppeln. Der Anteil der erneuerbaren Energien am Wärmeverbrauch liegt derzeit bei ca. 13% mit dem Ziel der Bundesregierung bis 2020 14% zu erreichen. Der Gebäudesektor ist im Vergleich zu anderen Sektoren relativ träge. Heutige Entscheidungen haben Auswirkungen für einen längeren Zeitraum: die technische Lebensdauer vieler Bauteile wird meist mit 40 oder mehr Jahren angenommen (z.B. Gebäudedämmung an Außenwand oder Dach). Zwar haben Heizanlagen typischerweise kürzere technische Lebensdauern, allerdings zeigt sich in der Praxis, dass auch hier häufig 25 oder mehr Jahre vergehen, bevor modernisiert wird. Vor dem Hintergrund der 2050er Ziele im Gebäudesektor ist es daher besonders wichtig, heutige Entscheidungen am gewünschten Zielzustand auszurichten, auch um Lock-in Effekte zu vermeiden.

### 3.2.1. Verstärkt Effizienz/Dämmen vs. verstärkt erneuerbare Energien

Tabelle 12: Übersicht der Ausgestaltungsmöglichkeiten von Wärmedämmung und erneuerbaren Energien (Quelle: Eigene Darstellung)

Möglichkeit	Beschreibung	Pro	Contra
Verstärkt Effizienz/Dämmen	<p>Sanierungsraten steigen stark an auf bis zu 3%/a</p> <p>Bestands-Gebäude werden auf ein sehr anspruchsvolles energetische Niveau gedämmt (Passivhausstandard)</p> <p>Neubauten werden im Passivhausstandard erstellt</p> <p>Der geringe Restwärmebedarf (ca. 400 TWh/a für Wohn- und Nichtwohngebäude im Jahr 2050) wird überwiegend durch erneuerbare Energien gedeckt, (unterfüttert durch einen fossilen Rest)</p>	<p>Jede eingesparte kWh muss auch nicht produziert werden</p> <p>Erneuerbare können alleine den heutigen Wärmebedarf nicht decken</p> <p>Erneuerbaren-Potenziale sind begrenzt</p> <p>Effizientere Heizsysteme und solche auf niedrigerem Temperaturniveau können besser erneuerbare Energieträger ins System integrieren</p>	<p>Nicht alle Gebäude sind sinnvoll zu dämmen: es gibt verschiedene Restriktionen (technische, bauphysikalische, geometrische)</p> <p>Dämmmaterial könnte teilweise der Sondermüll der Zukunft sein</p> <p>Aus Einzelgebäude-perspektive vermutlich die teurere Variante</p> <p>Dämmentscheidung liegt bei vielen Akteuren, EE kann relativ zentral ins System gebracht werden.</p>
Verstärkt erneuerbare Energien	<p>Auch hier wird viel gedämmt, allerdings auf ein niedrigeres Niveau, mit einer Sanierungsrate von ca. 1%/a</p> <p>Der verbleibende Wärmebedarf (ca. 600 TWh/a für Wohn- und Nichtwohngebäude im Jahr 2050) wird durch erneuerbare Energien gedeckt, vielfach in Form von Umweltwärme und Wärmepumpen</p> <p>Erfordert Umstellung der Heizverteilssysteme auf niedrige Vorlauftemperaturen, um Wärme auf Basis erneuerbarer Energieträger besser integrieren zu können</p>	<p>Erneuerbare senken die THG-Emissionen, wenn sie fossile Energieträger ersetzen</p> <p>Geringerer Dämmaufwand, vermutlich geringere Kosten</p> <p>Erhalt einer höheren Gebäudevielfalt – weniger „Gleichmachung“ durch effiziente Dämmstoffe</p>	<p>Heutiger Wärmebedarf kann nicht allein auf Basis erneuerbarer Energien gedeckt werden, ohne stark auf Importe zu setzen</p> <p>Importe notwendig? (Biomasse und/oder synthetische Brennstoffe)</p>
<b>Unsicherheiten und externe Treiber</b>			
Energiepreise			
Kosten eingesetzter Techniken			
Akzeptanz (wird NIMBY zu NOMH – „not on my house“?)			
„Verfügbarkeiten“ (Anzahl Fach-Handwerker, Stückzahlen Wärmepumpen, Solarthermieanlagen, Biomasse)			

## **Wechselwirkungen mit anderen Richtungsentscheidungen**

---

Betrachtung Biomasse/Höhe Biomasseimporte/Biomasse-Sektorallokation (vgl. Kapitel Bioenergie im Stromsektor vs. Wärmesektor vs. Verkehrssektor)

Höherer Strombedarf infolge stärkeren Wärmepumpeneinsatzes (Kapitel Stromsektor)

Rolle Gasnetze (Kapitel Konventionelles Erdgas vs. Gasnetz als Langzeitspeicher)

Rolle Wärmenetze (Kapitel Verstärkter Ausbau der Wärmenetze vs. weniger Wärmenetze)

Ziel 2050: -80% oder -95% THG Welt (Kapitel Übergeordnete Transformationsziele)

---

## Fragestellung/Problemaufriss

In den vergangenen Jahren haben zahlreiche Studien die möglichen Transformationspfade bis 2050 modelliert, so z.B. Thamling et al. (2015) für das BMWi oder Bürger et al. (2017) für das UBA. In beiden Studien wird aufgezeigt, dass weder eine Reduktion des Endenergieverbrauchs um mehr als ca. 60% bezogen auf 2008 möglich ist, noch, dass erneuerbare Energieträger unbegrenzt zur Verfügung stehen werden, um komplett auf Anstrengungen bei der Effizienzsteigerung der Gebäudehüllflächen zu verzichten. Vielmehr spannen beide Studien einen möglichen Zielkorridor auf, der nur mit einer Kombination der hier dargestellten Varianten erreicht werden kann bzw. in dem Freiheitsgrade zur Wahl zwischen den beiden Varianten nur noch relativ gering sind.

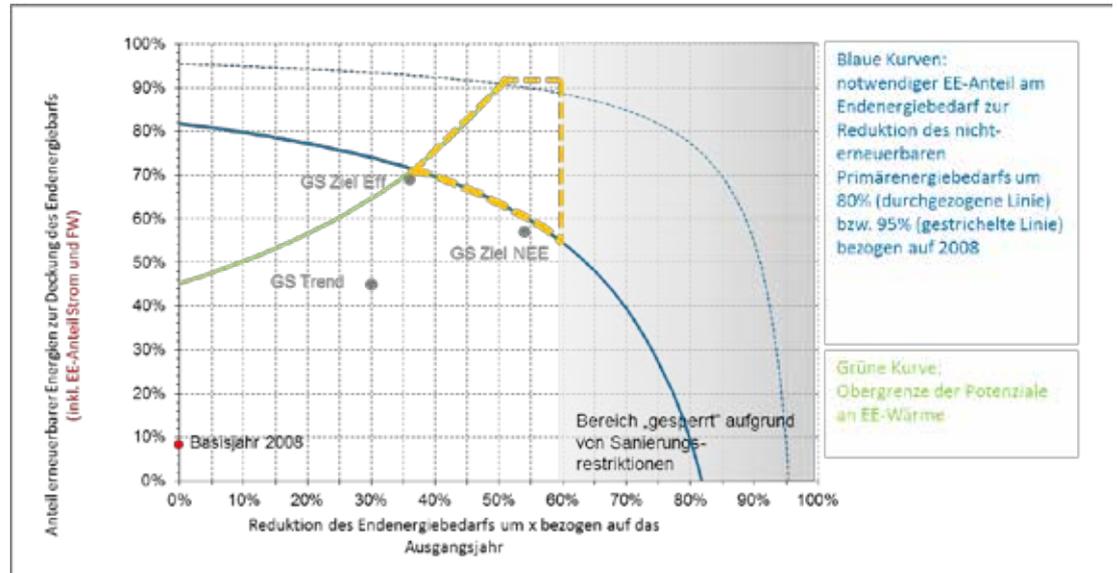


Abbildung 12: Darstellung des Zielbereichs zur Erreichung einer 80% bzw. 95% Reduktion des nicht-erneuerbaren Primärenergieverbrauchs im Gebäudebereich (Quelle: Öko-Institut)

## Beschreibung der Ausgestaltungsmöglichkeiten

Vor diesem Hintergrund werden im Folgenden die zwei Leitplanken des Zielkorridors mit den dazugehörigen Konsequenzen bei der Umsetzung und den Herausforderungen näher betrachtet.

### Verstärkt Effizienz/Dämmen:

Die Ausgestaltungsvariante mit Schwerpunkt Effizienz erfordert eine starke Anstrengung bei der Sanierungsaktivität an der Gebäudehülle. So ist es notwendig die Sanierungsrate von derzeit ca. 1% auf mindestens 2,5 bis 3% zu erhöhen, damit der bestehende Gebäudebestand bis zum Jahr 2050 in Gänze saniert werden kann. Gleichzeitig erfordert diese Variante eine deutliche Erhöhung der Sanierungstiefe, so dass jedes sanierte Haus nach der Sanierung einen Energieverbrauch auf Passivhaus-Niveau hat. Neben den Bestandsgebäuden ist es darüber hinaus sehr wichtig, dass im Neubaubereich von vornherein niedrige Energieverbräuche erreicht werden – hier gestaltet sich die Verbrauchsreduktion auch grundsätzlich leichter als im Bestand, da keinerlei technische Restriktionen vorliegen. Um im Neubau möglichst schnell ambitionierte energetische Standards zu erreichen, müsste der Niedrigenergie-Gebäudestandard auf dem Niveau des KfW-Effizienzhausstandards 55 definiert werden, mit dem Ziel diesen bis 2030 nochmals auf ein höheres Niveau (z.B. KfW-Effizienzhausstandards 40) zu steigern.

Aufgrund diverser Restriktionen erreicht diese Ausgestaltungsvariante eine Energieverbrauchsreduktion von insgesamt ca. 60%. Jochum und Mellwig (2014) zeigen, dass neben Restriktionen durch Denkmalschutz auch diverse weitere Aspekte verhindern, dass auf ein noch ambitionierteres energetisches Niveau saniert werden kann. So führen beispielsweise geometrische Aspekte (z.B. Hofdurchfahrten, Grundstücksgrenzen) dazu, dass ggf. keine genügend dicke Dämmschicht aufgetragen werden kann. Des Weiteren gibt es bauphysikalische Restriktionen, die z.B. den Feuchteschutz bei Holzbalkendecken betreffen.

Weitere Herausforderungen dieser Ausgestaltungsvariante sind die Menge und die Art der verwendeten Dämmstoffe. Auch Dämmstoffe haben eine begrenzte Lebensdauer und müssen zum Ende ihrer Lebenszeit ersetzt werden, was bei den benötigten Mengen die Entsorgung in Zukunft zu einem wichtigen Thema werden lässt. Das Thema Recycling spielt bisher nur eine untergeordnete Rolle. Herkömmliche Wärmedämmverbundsysteme (WDVS) auf Erdölbasis werden heutzutage vor allem der thermischen Verwertung zugeführt (sofern sie nicht aufgrund der verwendeten Brandschutzmittel als Sondermüll deklariert werden müssen). Natürliche Dämmstoffe haben bessere Recycling-Eigenschaften, erreichen aber zum Teil nicht die hohen Wärmedurchlasswiderstände der synthetischen Dämmstoffe. Zudem sind die natürlichen Dämmstoffe heutzutage meist teurer.

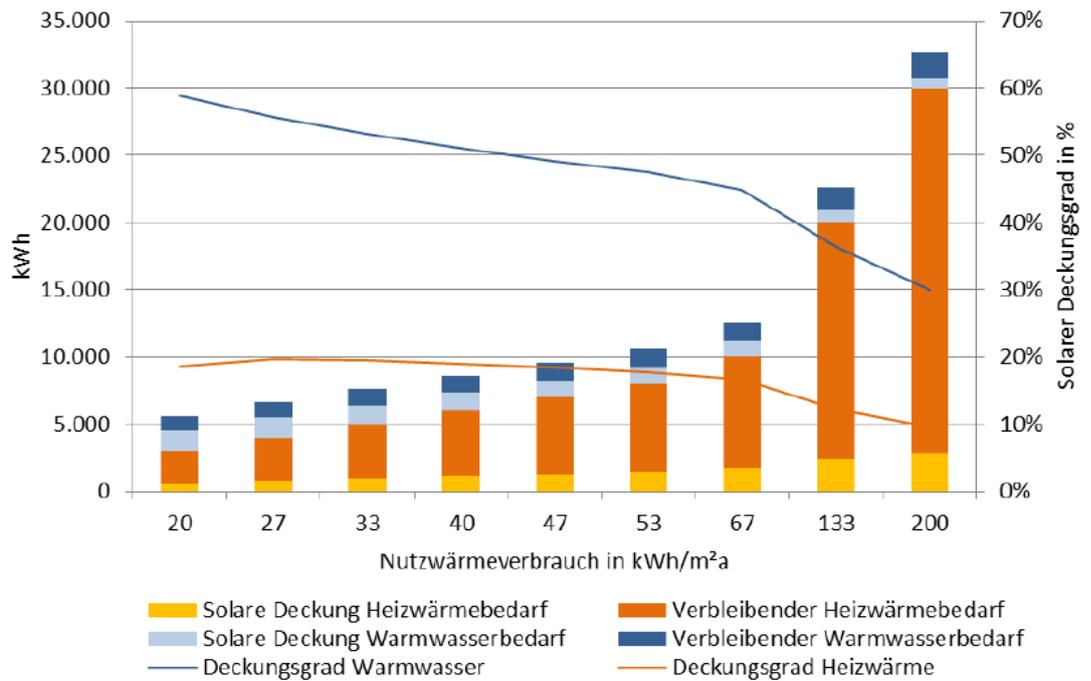
### *Verstärkt erneuerbare Energien*

Auch in der Ausgestaltungsvariante mit Schwerpunkt erneuerbare Energien sind deutliche Anstrengungen im Bereich der Gebäudehülle notwendig. Zur Erreichung der Ziele der Bundesregierung aus dem Energiekonzept (Deutsche Bundesregierung, 2010) sind auch hier eine Verringerung des Endenergieverbrauchs von 30% nötig. Der verbleibende Wärmebedarf wird durch erneuerbare Energieträger gedeckt, also eine Kombination aus Umweltwärme (mittels Wärmepumpen verfügbar gemacht), Solarthermie, Biomasse und ggf. synthetischen Brennstoffen auf Basis erneuerbaren Stroms. Auch der Strom für die Wärmepumpen kommt aus erneuerbaren Quellen.

Auch bei dieser Ausgestaltungsvariante gibt es Restriktionen hinsichtlich der zur Verfügung stehenden Ressourcen. Jochum et al. (2017) haben die Potenziale der verschiedenen erneuerbaren Energieträger genauer untersucht. So ist beispielsweise bei der Solarthermie der Deckungsanteil für die Warmwasserbereitstellung je nach Nutzwärmeverbrauch des betrachteten Gebäudes nie höher als knapp 60%. Für Solarthermie als Raumwärmeunterstützung sinkt dieser Deckungsanteil noch einmal deutlich auf gerade einmal 20%. Solarthermie kommt also vor allem eine unterstützende Rolle zu. Biomassepotenziale sind gleichfalls begrenzt. Hier gibt es allerdings Unsicherheiten bezüglich der Rolle der Biomasse im Wärmebereich (Stichwort Sektorkonkurrenz, siehe Kapitel Sektorkopplung Elektrifizierung vs. synthetische Brennstoffe) und auch der Rolle von Biomasseimporten. Umweltwärme steht grundsätzlich unbegrenzt zur Verfügung. Allerdings muss sichergestellt sein, dass der Strom für die Wärmepumpen aus erneuerbaren Quellen stammt, was bei einem starken Wärmepumpen Ausbauszenario dazu führt, dass auch deutlich mehr erneuerbare Stromquellen zugebaut werden müssen. Die Rolle von synthetischen Brennstoffen auf Basis erneuerbaren Stroms ist noch unklar<sup>5</sup> (vgl. Kapitel 3.4.1).

---

<sup>5</sup> Bisher steht lediglich fest, dass rein physikalisch der Prozess der verschiedenen Energieträgerumwandlungen (Elektrolyse, ggf. Methanisierung) hohe Verluste mit sich bringt. Aus rein energetischer Sicht ist eine direkte Nutzung von Strom in Wärmepumpen der Herstellung von synthetischen Brennstoffen vorzuziehen.



© Beuth HS/ifeu, 2016

Abbildung 13: Erträge und Deckungsanteile der Solarthermie in Abhängigkeit von Nutzwärmeverbrauch (Quelle: Jochum et al. (2017))

Grundsätzlich sind in dieser Ausgestaltungsvariante Umstellungen der Heizverteilsysteme von hohen auf niedrigere Vorlauftemperaturen vonnöten, da sich die verschiedenen erneuerbaren Energieträger so am effizientesten zur Raumwärmebereitstellung nutzen lassen. Wärmenetze auf niedrigeren Temperaturniveaus komplementieren die Versorgung durch erneuerbare Energieträger mittels Großwärmepumpen, Solarthermie-Kollektorfeldern und Biomasse-Heizwerken (vgl. Kapitel Verstärkter Ausbau der Wärmenetze vs. weniger Wärmenetze).

### Gegenüberstellung der Ausgestaltungsmöglichkeiten

Beide hier skizzierten Ausgestaltungsvarianten erfordern große Anstrengungen sowohl bei der energetischen Modernisierung der Gebäudehüllen als auch beim Ausbau der erneuerbaren Wärmeenergien. So muss in einer 80% THG Reduktionswelt der Energieverbrauch um mindestens 35 bis knapp 60% reduziert werden. In einer 95% THG Reduktionswelt sind die Handlungsspielräume nochmals kleiner mit erneuerbare Energien Anteilen von um die 90% an der Wärmeversorgung sowie Effizienzsteigerungen von 50-60%.

Tabelle 13: Vergleich der beiden Ausgestaltungsvarianten hinsichtlich der benötigten Anstrengungen für unterschiedliche Treibhausgas-Reduktionsziele (Quelle: Öko-Institut)

	Verstärkt erneuerbare Energien		Verstärkt Effizienz	
	EE-Anteil	Reduktion EEV	EE-Anteil	Reduktion EEV
Ziel -80% THG	72%	35%	55%	60%
Ziel -95% THG	91%	50%	88%	60%

Akzeptanzprobleme dürfte es am Ende bei beiden Ausgestaltungsvarianten geben: hier könnte es – verkürzt gesagt – auf die Frage NIMBY („*not in my backyard*“) oder NOMH („*not on my house*“) hinauslaufen.

Große Unsicherheiten in beiden Ausgestaltungsvarianten stellen die zukünftigen Energiepreise dar. Die Variante mit verstärkten Anstrengungen im Bereich der energetischen Gebäudesanierung ist aus Kostenperspektive dabei die vorhersehbarere Variante, da die Kosten für die Sanierung besser zu prognostizieren sind und die Kostenunsicherheit für den dann verbleibenden (geringeren) Energiebedarf verkleinert wird.

Beide Ausgestaltungsvarianten stehen vor der Herausforderung genügend qualifizierte Handwerker für die benötigten Arbeiten zur Verfügung zu haben. Vermutlich ist diese Hürde bei der verstärkten Installation von Heizungstechnologien auf Basis erneuerbarer Energieträger etwas niedriger als bei der Variante mit verstärkten Gebäudehüllen-Effizienzbemühungen, wo es schon heute bei einer Sanierungsrate von ca. 1% (vgl. IWU et al. (2010)) zu Engpässen kommt.

An dieser Stelle sei darauf hingewiesen, dass die Nutzung lokal erzeugten erneuerbaren Stroms für die Wärmebereitstellung durchaus kritisch zu hinterfragen ist, insbesondere wenn keine Netzengpässe vorhanden sind. Es sind Situationen denkbar, in denen lokaler PV Strom mittels Heizstab in Wärme umgesetzt wird und gleichzeitig im Strommix noch Kohlestrom erzeugt wird. Aus Gesamtsystemperspektive wäre es für eine maximale THG-Minderung in einer solchen Situation zielführender, den PV Strom in klassischen Stromanwendungen zu nutzen und die Wärme mittels einer anderen Technologie bereit zu stellen (z.B. Gas), um weniger Kohlestrom erzeugen zu müssen.

## Stakeholder-Positionen

Seitens der Stakeholder gibt es eine große Vielfalt hinsichtlich der bevorzugten Ausgestaltungsvariante, die naturgemäß an den Interessen der jeweiligen Mitglieder ausgerichtet sind. Im Klimaschutzplan 2050 bekennt sich die Bundesregierung zum Grundsatz „*efficiency first*“ (BMUB, 2016). Bezüglich des Neubaus wird dort weiter ausgeführt, dass: „spätestens zum Jahr 2030 der energetische Standard von Gebäuden schrittweise auf einen Wert deutlich unterhalb des heute geförderten „Effizienzhaus 55“-Standards weiter zu entwickeln ist“.

In der wissenschaftlichen Szene wird größtenteils anerkannt, dass sowohl im Bereich der Gebäudehüllflächen-Effizienz als auch bei der Umstellung auf erneuerbare Energien große Anstrengungen nötig sind (vgl. z.B. Thamling et al. (2015) oder Bürger et al. (2017)). Je nach betrachtetem Zielbereich verbleiben hier mehr oder weniger Freiheitsgrade. So stellt eine Zielwelt mit einer THG Reduktion um 80% noch mehr Freiheitsgrade zur Verfügung als eine 95% Reduktions-Welt.

Für den WWF stellt die „Senkung des Wärmeverbrauchs im Gebäudebestand eine der zentralen Säulen der Wärmewende dar [...]“ (WWF Deutschland, 2017). Die DUH fordert die „Energieeffizienz und erneuerbare Energien im Gebäudebereich nachhaltig [zu] steigern“ (Ahmels, 2017) und gleichzeitig auch Naturdämmstoffe stärker zu fördern.

Die DENEFF vertritt diverse Unternehmen im Bereich der Energieeffizienz und fordert u.a. eine Abschaffung von Ausnahmeregelungen bei der EnEV, eine Stärkung des Vollzugs der EnEV und eine Ausweitung der Anwendung wesentlicher Regelwerke auf den Bestand (und nicht nur auf den Neubau). Darüber hinaus soll der nach EU-Recht bis spätestens Ende 2018 zu definierende Niedrigstenergiestandard für neue Gebäude „möglichst ambitioniert sein“ (DENEFF, 2018). Der Bundesverband energieeffiziente Gebäudehülle (BUVEG) zielt stärker auf den Gebäudebestand: „Wir fordern, die Sanierungsquote auf mindestens 2 Prozent pro Jahr zu steigern. Um dies zu erreichen, sollten Sanierungsmaßnahmen steuerlich gefördert werden, bestehende Fördermaßnahmen zusammengelegt und vereinfacht werden sowie mit Klimaschutzplänen auf kommunaler Ebene Anreize für eine planvollere Sanierungspolitik geschaffen werden“ (BuVEG, 2017). Auch die dena/geea schreibt: „Ziel muss es sein, deutlich mehr energetisch hochwertige Sanierungsmaßnahmen in der Anlagentechnik und an der Gebäudehülle auszulösen als heute, ohne dabei die Leistungsfähigkeit der investierenden Gebäudeeigentümer und der Nutzer bzw. Mieter zu überfordern. Der Fokus dieser Maßnahmen sollte auf dem Gebäudebestand liegen, der Neubau bzw. Ersatzneubau sollte aber nicht außer Acht gelassen werden“ (dena & geea, 2017).

Die Wohnungswirtschaft in Form des GdW hingegen fordert „die Mindestanforderungen an die Gebäudedämmung im Neubau wie im Bestand nicht weiter zu erhöhen, [...] und als Alternative zu hohen Dämmniveaus die Dekarbonisierung von Energieträgern voranzutreiben“ (GdW Bundesverband deutscher Wohnungs- und Immobilienunternehmen e.V., 2015).

Eine Reihe von Verbänden sieht einen Mix der Ausgestaltungsvarianten als zielführend an. So schreibt der BEE: „Grundsätzlich muss der Einsatz Erneuerbarer Energie im Gebäudebestand verstärkt ange-reizt werden. Eine Pflicht zum Einsatz von Erneuerbarer Energien beim Heizungstausch, wie es sie in Baden-Württemberg bereits gibt, wäre sinnvoll. Ergänzt werden könnte dies durch eine steuerliche Förderung der energetischen Sanierung, die auch speziell Erneuerbare Heizungen und Hybridheizungen adressiert“ (BEE, 2018). Auch der BWP findet „eine weitere Verschärfung [des Anforderungs-niveaus im Sinne der Definition des Niedrigstenergiegebäudes] angebracht“ (Bundesverband Wärme-pumpe, 2016). Gleichzeitig betont der BWP, dass bei der Zusammenführung von EnEV und EEWär-meG „der verpflichtende Charakter zur Nutzung von erneuerbaren Wärmetechnologien aus dem EE-WärmeG grundsätzlich erhalten bleibt: [...] Tendenziell wäre es im Sinne der Ziele der Energieeffi-zienzstrategie Gebäude (ESG) geboten, diesen Pflichtanteil anzuheben.“ Auch der BDH sieht sowohl Effizienzsteigerungen als auch den verstärkten Einsatz erneuerbarer Energieträger als zielführend an (BDH, 2016).

Diverse Verbände fordern Technologieoffenheit bezüglich der Energieversorgung von Gebäuden und argumentieren, dass in Zukunft fossile Brennstoffe durch synthetische Brennstoffe auf Basis erneuer-barer Energien ersetzt werden können (vgl. BDEW (2017a) oder Frontier Economics et al. (2017)). Auch der DVGW schlägt in diese Kerbe, allerdings mit Fokus auf Gas: „Zunächst sollten der ideale Mix aus einem Fuel-Switch, also der Ablösung von Kohle und Erdöl durch Gase als Energieträger der Wärmebereitstellung, und die Durchführung von Modernisierungsmaßnahmen im Vordergrund stehen“ (DVGW, 2017c).

In den Wahlprogrammen zur Bundestagswahl 2017 positionieren sich die Parteien mit unterschiedli-chen Schwerpunkten. So wollen Bündnis 90/Die Grünen „eine Effizienzrevolution einleiten“ (Bündnis 90 / Die Grünen, 2017). Weiter heißt es dort: „wir ein Energiespargesetz vor, das ambitionierte, aber realistische Vorgaben macht. [...] Wir wollen die Nutzung erneuerbarer Wärme im Gebäudebestand voranbringen, die energetische Modernisierung von Häusern und ganzen Stadtvierteln fördern [...]. Die von der EU geforderten Vorgaben für energieeffiziente Gebäude wollen wir so ausgestalten, dass neue Gebäude nur noch sehr wenig Energie verbrauchen und hauptsächlich erneuerbar beheizt werden.“ Auch Die Linke, die SPD und die CSU gehen auf das Thema Energieeffizienz ein. Bei Die Linke heißt es konkret: „Um den Altbaubestand bis 2050 nahezu vollständig energetisch zu sanieren, muss sich die Sanierungsrate von derzeit 1,1 Prozent auf zwei Prozent im Jahr verdoppeln. Dazu sollen ein verbindlicher Plan erstellt und die Förderprogramme für energetische Gebäudesanierung deutlich und dauerhaft erhöht werden“ (Die Linke, 2017). Die SPD schreibt: „Maßnahmen zur Energieeffizienz wer-den wir ausbauen. Wir wollen insbesondere den öffentlichen Gebäudebestand und den öffentlichen Nahverkehr zu Vorbildern des nachhaltigen und energieeffizienten Verbrauchs entwickeln“ (SPD, 2017). Gleichzeitig wird das Thema Wirtschaftlichkeit angesprochen: „Wir werden Hausbesitzerinnen und Hausbesitzer weiterhin dabei unterstützen, ihre Häuser und Gebäude auf wirtschaftliche Weise energetisch zu sanieren und mit erneuerbaren Energien zu versorgen.“ Bei der CSU wird die Förde-rung energetischer Sanierungen hervorgehoben: „Wir wollen die energetische Sanierung von Wohnei-gentum fördern. Der Gebäudesektor ist für die Erreichung der Klimaschutzziele entscheidend. Künftig soll es auch für selbst genutztes Wohneigentum neben dem Handwerkerbonus eine steuerliche Förde-rung für energetische Modernisierungsmaßnahmen über fünf Jahre geben. Kosten für besonders energiesparende Maßnahmen sollen zehn Jahre steuerlich geltend gemacht werden können“ (CSU, 2017). Bei der CDU steht hingegen weniger die Energieeffizienz im Vordergrund. In ihrem Programm heißt es: „Neben dem weiteren Ausbau der erneuerbaren Energien wollen wir die Sektorenkopplung weiterentwickeln“ (CDU, 2017). Und weiter: „Langfristig muss ein großer Teil der fossilen Energien wie Kohle, Öl und Gas durch umweltfreundliche Energien ersetzt werden.“ Gleichzeitig „[...] lehnen [wir] dirigistische staatliche Eingriffe in diesem Bereich ab und setzen stattdessen auf marktwirtschaftliche Instrumente.“ Bei Die Linke wird es in Bezug auf die erneuerbare Energien konkreter: „Der ver-pflichtende Anteil erneuerbarer Energien an der Wärmeversorgung für Neubauten muss schrittweise gesteigert und bei grundlegenden Sanierungen auch auf den Gebäudebestand ausgeweitet werden. Der regenerative Wärmeanteil in Deutschland soll 2020 mindestens 20 Prozent betragen“ (Die Linke, 2017). Allein die AfD vertritt eine grundsätzlich andere Meinung: „Die ständige Verschärfung von Ver-ordnungen und Gesetzen im Wärmesektor, wie die Energieeinspar-Verordnung (EnEV) und das Er-neuerbare-Energien-Wärmegesetz (EEWärmeG) zur Dämmung und Heizung, führt zu stark steigenden Bau- und Rückbaukosten und entsprechend hohen Mieten, die die unteren Einkommensgruppen be-

sonders hart treffen“ (AfD, 2017). Daher ihre Forderung: „Die EnEV und das EEWärmeG sind abzuschaffen.“

### 3.2.2. Verstärkter Ausbau der Wärmenetze vs. weniger Wärmenetze

Tabelle 14: Übersicht Ausgestaltungsmöglichkeiten Wärmenetze (Quelle: Eigene Darstellung)

Möglichkeit	Beschreibung	Pro	Contra
Verstärkter Ausbau Wärmenetze	Über die bisher existierenden Wärmenetze hinaus wird verstärkt der weitere Wärmenetzausbau vorangetrieben, sowohl in Neubaugebieten als auch im Bestand; die bisher existierenden Netze werden erhalten und ggf. ertüchtigt; <u>Herausforderungen/Unsicherheiten</u> : Akzeptanz Betroffener, Wirtschaftlichkeit, Regelung zu dezentraler Einspeisung (Vergütung?), Regelungen zum Verlegen von Netzen im Bestand (Anschlusspflicht?)	„zentrale“ Möglichkeiten der Dekarbonisierung Einbindung der Bürger bei der Wärmewende (als „Prosumer“, die z.B. via Solarthermie oder BHKW-Anlagen dezentral ins Wärmenetz einspeisen) Effizienzgewinne in Quartieren mit ohnehin bestehenden, aber bisher ungenutzten Wärmequellen (z.B. Abwärme aus GHD, Industrie)	Abnehmende Wärmedichten infolge von Sanierungstätigkeiten führen zu geringerer Wirtschaftlichkeit der Wärmenetze Akzeptanz der Betroffenen unsicher; mögliche Zwangsumstellung auf Wärmenetz ggf. schwer vermittelbar Netzverluste
Weniger Wärmenetze (keine neuen und kein Erhalt der bestehenden Netze)	Weder werden bisher existierende Wärmenetze in großem Umfang weiterbetrieben, sobald sie renovierungsbedürftig sind, noch werden neue Netze gebaut; <u>Herausforderungen/Unsicherheiten</u> : technische Herausforderung: Wärmenetzbetrieb bei rückläufiger Nachfrage (Netzflexibilität)	Abnehmende Wärmedichten machen einen wirtschaftlichen Betrieb von Wärmenetzen fraglich Mangelnde Akzeptanz für Wärmenetze, gerade bei Gebäudeeigentümern im Bestand Technologieoffenheit: jeder Gebäude-eigentümer kann selber entscheiden mit welcher Technik geheizt wird	Mögliche Effizienzgewinne in Quartieren mit ohnehin bestehenden, aber bisher ungenutzten Wärmesenken (z.B. Abwärme aus GHD, Industrie) bleiben ungenutzt
<b>Unsicherheiten und externe Treiber</b>			
Energiepreise Kosten eingesetzter Techniken Akzeptanz			
<b>Wechselwirkungen mit anderen Richtungsentscheidungen</b>			
Betrachtung mehr erneuerbare Wärme vs. mehr Energieeffizienz (vgl. Kapitel Verstärkt Effizienz/Dämmen vs. verstärkt erneuerbare Energien) Betrachtung zur Entwicklung von PtG/PtL (vgl. Kapitel Sektorkopplung Elektrifizierung vs. synthetische Brennstoffe) Rolle der Gasnetze (Kapitel Konventionelles Erdgas vs. Gasnetz als Langzeitspeicher)			

## **Fragestellung/Problemaufriss**

Wärmenetze sind verstärkt in die Diskussion geraten, da sie die Möglichkeit bieten, mit der Umstellung der einspeisenden Energieträger von fossil auf erneuerbar alle angeschlossenen Verbraucher „auf einen Schlag“ zu dekarbonisieren, so dass nicht jeder einzelne Verbraucher eigene Wege der Dekarbonisierung zu gehen braucht. Allerdings gehen im Zuge der fortschreitenden Gebäudesanierungen auch die benötigten Wärmemengen in den Netzen zurück, so dass diese bei zu geringer Wärmenachfrage technische und wirtschaftliche Probleme bekommen könnten. Wärmenetze bieten also einerseits eine elegante Möglichkeit der Dekarbonisierung, andererseits sind ihrer Wirtschaftlichkeit infolge der gleichzeitig nötigen Effizienzsteigerungen beim Raumwärmeverbrauch Grenzen gesetzt.

## **Beschreibung der Ausgestaltungsmöglichkeiten**

Die hier gewählten Ausgestaltungsvarianten beschränken sich auf zwei Extremvarianten: zum einen ein verstärkter Zubau von Wärmenetzen (sowohl Erhalt und Ausbau bestehender Netze als auch Bau neuer Netze), zum anderen ein stagnierender Ausbau, begrenzter Erhalt und letztlicher Rückbau der bestehenden Infrastruktur.

### *Verstärkter Ausbau Wärmenetze*

In dieser Variante wird verstärkt auf den Erhalt, Ausbau und Neubau von Wärmenetzen gesetzt. Bestehende Netze werden gezielt gestärkt und in Gebiete erweitert, die bisher ohne Wärmenetze versorgt werden. Im Gebäudebestand wird dabei der Fokus auf Gebiete mit hohen Restwärmebedarfsdichten gelegt. Dies sind zum einen innerstädtische Bereiche im Allgemeinen und zum anderen Gebiete, welche aufgrund diverser Restriktionen (z.B. Denkmalschutz) nur schwer bzw. eingeschränkt sanierbar sind. Speziell dort wo Sanierungen aufgrund verschiedener Restriktionen schwierig sind (z.B. aufgrund von Denkmalschutz, geometrischen Restriktionen, Überdämmung von Bürgersteigen etc.), verbleiben auch 2050 vergleichsweise hohe Wärmebedarfe, die es möglichst CO<sub>2</sub>-neutral zu decken gilt. Hier bieten sich Wärmenetze als sinnvolle Lösungsoption an, da anzunehmen ist, dass die vergleichsweise hohen Wärmedichten selbst einen kompletten Wärmenetz-Neubau wirtschaftlich darstellbar machen.

Im Neubaubereich sind Wärmenetze vergleichsweise günstig zu verlegen. Gleichzeitig sind die dortigen zu deckenden Wärmebedarfe ungleich niedriger als im Bestandsbereich. Um dennoch einen wirtschaftlichen Betrieb zu gewährleisten, scheint es sinnvoll, in Neubaugebieten einen Anschlusszwang durchzusetzen.

Jochum et al. (2017) haben für verschiedene Szenarien die Potenziale für den Bau neuer Wärmenetze in Abhängigkeit der Gemeindegröße berechnet. Es zeigt sich, dass je nach Sanierungsaktivität höhere bzw. geringere Potenziale erschließbar sind. Zur Einordnung: Im Jahr 2016 wurden laut BMWI (2018) 9% des Raumwärmeverbrauchs in Wohn- und Nichtwohngebäuden von insgesamt 707 TWh durch Fernwärme bereit gestellt.

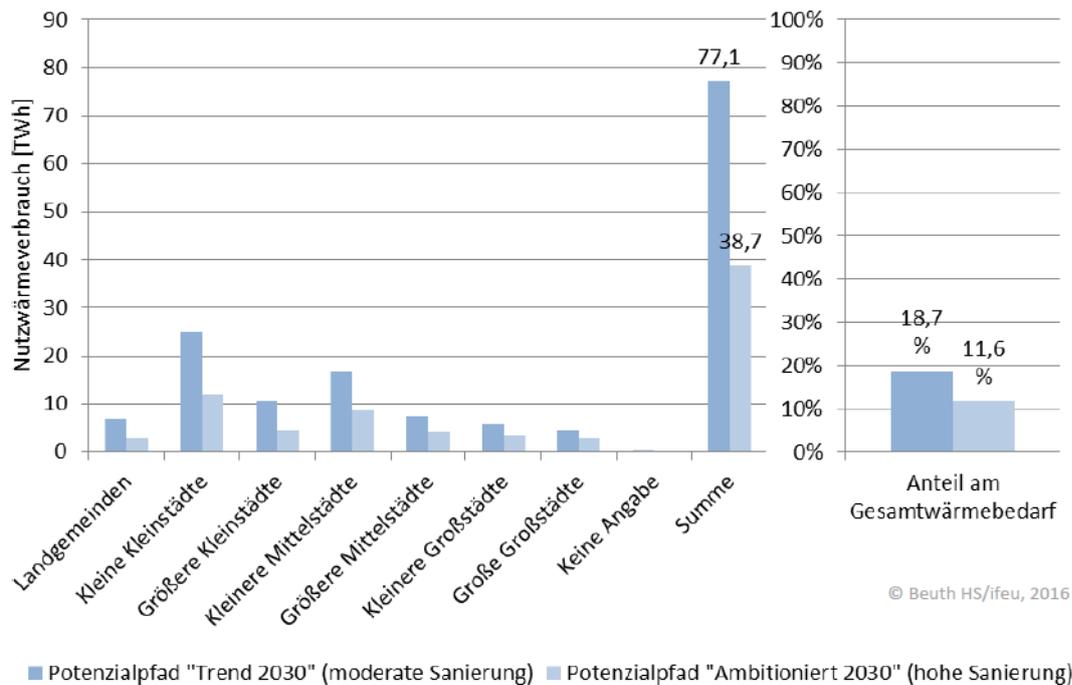


Abbildung 14: Potenziale für den Bau neuer Nahwärmenetze (Quelle: Jochum et al. (2017))

Wärmenetze haben den positiven Effekt, als „Sammler“ verschiedener Wärmeeinspeiser zu fungieren und somit beispielsweise eine Kombination aus industrieller Abwärme, Großwärmepumpen und Solarthermie in einem Netz flexibel zu vereinen und an die Nachfrageseite angepasst den Wärmebedarf zu decken. Wärmespeicher runden als zusätzliche Flexibilitätsoption das Gesamtbild des Wärmenetzes ab.

Eine wichtige Frage stellt die Form der erneuerbaren Energien für den Wärmenetzbetrieb dar. Hier gilt es, die lokalen Gegebenheiten zu analysieren. Solarthermie hat hohe Flächenbedarfe und steht als Wärmequelle vor allem im Sommer zur Verfügung. Um Biomasse als begrenzt verfügbarer Ressource werden verstärkt Nutzungskonkurrenzen entstehen – viele Studien sehen Biomasse verstärkt als Energiequelle im Verkehrssektor. Umweltwärme mittels Großwärmepumpe ist vor allem aus Erdwärme sinnvoll. Wo vorhanden sollten Abwärmequellen an das Wärmenetz angeschlossen werden. Gebiete mit Tiefengeothermiepotenzialen wie z.B. in und um München können diese Wärmequelle mehr oder weniger direkt in Wärmenetzen nutzbar machen.

Herausforderungen dieser Wärmenetzausbau-Variante sind vielfältiger Natur. Zum einen müssen die betroffenen Anwohner für die Wärmenetze gewonnen werden (Akzeptanz!). Dies ist im Bestand sicher eine größere Herausforderung (Umbauarbeiten, unbekannte Technik, Abhängigkeit, befürchtetes Monopol des Betreibers, Anschlusszwang?) als im Neubau (Abhängigkeit, Monopol, Anschlusszwang?). Zum anderen müssen sich potenzielle Betreiber finden, die das Wärmenetz wirtschaftlich betreiben können. Für Bestandsnetze sollte letzteres leichter möglich sein, als für komplett neu gebaute Wärmenetze.

Chancen des Wärmenetzausbaus liegen auch in der verstärkten Einbindung der Bürger bei der Wärmewende: beispielsweise können sie als „Prosumer“, die z.B. via Solarthermie überschüssige Wärme dezentral ins Wärmenetz einspeisen, vom weiteren Ausbau der Wärmenetze profitieren. Dies könnte auch zu einer höheren Akzeptanz der durchzuführenden Maßnahmen führen. Allerdings bedarf es hierzu zunächst der Erstellung eines rechtlichen Rahmens.

#### Weniger Wärmenetze

In dieser Variante werden Wärmenetze nicht weiter als Wärmeversorgungsoption verfolgt. Dies hat zur Folge, dass größtenteils Einzelgebäuelösungen umgesetzt werden müssen.

Auch hier stellt sich die Frage der Form der erneuerbaren Energien für die Wärmeversorgung. Die Flächenbedarfe für Solarthermie konkurrieren auf der Einzelgebäudeebene verstärkt mit Stromerzeugung aus PV auf den Dachflächen. Gleichzeitig sind die Deckungsanteile der Solarthermie für den Raumwärmebedarf beschränkt. Für Biomasse besteht neben der begrenzten Verfügbarkeit und den Nutzungskonkurrenzen das Problem der Feinstaubbelastung (bessere Filtertechnik und eine weitge-

hende Automation der Erzeugung werden hier allerdings zukünftig Abhilfe schaffen). Damit verbleiben noch dezentrale Wärmepumpen und weitere Stromanwendungen, die auf Basis eines möglichst CO<sub>2</sub>-neutralen Stroms betrieben werden. Einige wenige Szenarien sehen auch den weiteren Betrieb von Brennstoffkesseln im Jahr 2050 vor, welche dann mit synthetischem Brennstoff auf Strombasis betrieben werden (vgl. Hecking et al. (2017) oder Klein et al. (2017)).

Da keine Kosten für eine größere Infrastruktur (Wärmenetz) anfallen, bietet diese Variante in vielerlei Hinsicht größere Flexibilität. So müssen Investitionsentscheidungen über kürzere Zeiträume von nur 20 bis 30 Jahren getroffen werden. Nach Ende der technischen Lebensdauer der Einzelheizungen kann flexibel auf neuere und modernere Techniken zurückgegriffen werden. Dies ist auch vor dem Hintergrund sinkender Wärmebedarfe günstig, da die neue Heizanlage entsprechend für eine niedrigere Nachfrage ausgelegt werden kann. Die Gebäudeeigentümer fühlen sich sicherer mit einer Heizanlage, die im eigenen Keller steht (obwohl es auch hier Abhängigkeiten z.B. vom genutzten Brennstoff und seiner Lieferung gibt). Sie können zwischen verschiedenen Lieferanten/Anbietern auswählen.

## **Gegenüberstellung der Ausgestaltungsmöglichkeiten**

Beide Varianten bieten in ihren verschiedenen Ausgestaltungen die Möglichkeit, die Ziele 2050 zu erreichen. Die Wärmenetzausbauvariante hat den Vorzug, dass „mit einem Schlag“ viele Gebäude mit dekarbonisierter Wärme versorgt werden können, wohingegen die Variante mit Lösungen auf Einzelgebäudeebene eine Vielzahl von Aktivitäten/Akteuren benötigt, um eine Dekarbonisierung durchzuführen.

Hinsichtlich der unterschiedlichen Kosten der beiden Varianten lassen sich nur schwer gesicherte Aussagen treffen. Die Bereitstellung neuer Infrastruktur in der Variante mit verstärktem Wärmenetzausbau führt sicherlich in der Bauphase zunächst zu höheren Kosten. Gleichzeitig könnte ein intelligentes Wärmenetz mit (Groß-) Wärmespeicher und flexibel zuschaltbaren (Groß-) Wärmequellen die Wärme insgesamt wirtschaftlicher bereitstellen und zudem noch systemdienliche Funktionen übernehmen. Eine zunehmende Bepreisung fossiler Energieträger sollte beide Ausgestaltungsvarianten gleichermaßen betreffen. Allerdings ist es bei der Wärmebereitstellung mittels Wärmepumpen eher denkbar, dass ein Wärmenetz mit angeschlossenem Wärmespeicher plus smarterer Großwärmepumpe insgesamt kostengünstiger Wärme bereitstellen kann, als viele Einzelgebäude-Wärmepumpen mit dazugehörigen Kleinspeichern.

Der Bau eines Wärmenetzes benötigt längerfristig mehr Planungssicherheit für den Betreiber und ist somit zu einem gewissen Grade die weniger flexible der betrachteten Varianten. Einzelgebäudeheizungen werden typischerweise schon nach 20 bis 30 Jahren ausgewechselt – sie können beim Wechsel durch neueste Heizungstechnologien ersetzt werden und leichter auf einen niedrigeren Wärmebedarf ausgelegt werden.

Die Variante mit verstärktem Wärmenetzausbau birgt das Potenzial die „Wärmewende“ als Gemeinschaftsprojekt für die Bürgerinnen und Bürger greifbarer zu machen (vgl. Erfahrungen in Bioenergie-dörfern oder in Dänemark, z.B. Insel Samsø), als es in der Variante mit dezentralen Einzelgebäuelösungen der Fall ist. Zudem können bei geeigneter Ausführung der Netze die Angeschlossenen auch als „Prosumenten“ auftreten, indem sie selber überschüssige Wärme in das Netz einspeisen. Dies setzt allerdings voraus, dass diese Prosumenten neben dem Anschluss an das Wärmenetz zusätzlich eine eigene Anlage installieren und finanzieren können.

Grundsätzlich gilt bei der Umstellung auf erneuerbare Energieträger: je niedriger die benötigten Vorlauftemperaturen der Heizungsverteilsysteme in den Gebäuden sind, desto effizienter können die erneuerbaren Energien dort eingesetzt werden. Hier spielt es keine Rolle, ob die erneuerbaren Energien mittels zentralen Wärmenetzes oder dezentraler Heizanlage im Gebäude zu Wärmezwecken eingesetzt werden. Für eine zukünftige Gebäudewärmebereitstellung, die fast ausschließlich auf erneuerbaren Energieträgern basiert, ist es deshalb unerheblich, ob die Wärme mittels dezentraler Heizung oder Wärmenetz bereitgestellt wird.

Die Variante mit verstärktem Wärmenetzausbau stößt sicherlich auf größere Hürden als die Variante ohne Wärmenetzausbau. Dies liegt an der mangelnden Vertrautheit der Gebäudeeigentümer mit einer „unbekannten“ Technik (dies gilt allerdings nur eingeschränkt, da teilweise auch Einzelgebäudeheizungen zukünftig als „neue“ Techniken daher kommen), der gefühlten Abhängigkeit von einem Netzbetreiber und seiner Monopolstellung und somit der Akzeptanz des Netzes insgesamt. Hinzu kommen mögliche Anschlusszwänge, die auf wenig Zustimmung stoßen (es sei denn der Zwang geht mit eindeutigen wirtschaftlichen Vorteilen einher, vgl. Dänemark). Aus Sicht der Betreiber von Wärmenetzen

kommt als weiteres Hindernis die zukünftige Abnahme der Wärmenachfrage hinzu, welche einerseits technisch gelöst werden muss und andererseits zu geringeren Absatzmengen und folglich niedrigeren Erlösen führt

## Stakeholder-Positionen

Von Seiten der Wissenschaft vertreten viele Institute die Meinung, dass Wärmenetze eine wesentliche Rolle bei der Dekarbonisierung der Gebäudewärmebereitstellung spielen können und werden (z.B. Schneller et al. (2017), Bürger et al. (2017), Paar et al. (2013)). In einer Studie des Hamburg-Instituts heißt es dazu: „Wärmenetze können [...] ein wichtiger Schlüssel zur kostengünstigen Integration Erneuerbarer Energien in den Wärmemarkt sein. Hierzu sollten sie in einer neuen Innovations- und Entwicklungsphase zu kommunalen Wärmeplattformen entwickelt werden, die verschiedene lokale nachhaltige Wärmequellen bündeln, speichern und verteilen“ (Maaß et al., 2015). „Innovative Wärmenetze können erneuerbare Energien und Abwärme perspektivisch kosteneffizient und flexibel integrieren und somit einen wesentlichen Beitrag zur Wärmewende, der angestrebten Dekarbonisierung der Wärmeversorgung, leisten“, schreiben Schneller et al. (2017) in einer vom BMWi geförderten Studie. Ebenfalls vom BMWi in Auftrag gegeben wurde die Studie „Wärmenetze 4.0“, welche festhält: „Wärmenetze sind ein wichtiges Infrastrukturelement für eine zukünftige Wärmeversorgung und weisen trotz rückläufigen Gebäudewärmebedarfs ein beträchtliches Ausbaupotenzial auf (mit einem langfristigen wirtschaftlichen Potenzial von rund 25 % bis 30 % des Wärmebedarfs). Wärmenetzinfrastrukturen bieten den systemischen Vorteil eines räumlichen und zeitlichen Ausgleichs von Wärmequellen und Wärmenachfrage in einem technisch und wirtschaftlich optimierten System über angepasste Vor- und Rücklauftemperaturen, Wärmespeicher und Sektorkopplung“ (IFEU et al., 2017).

Auch Umweltverbände schätzen die Potenziale von Wärmenetzen als hoch ein. Die Deutsche Umwelthilfe (DUH) schreibt dazu: „Derzeit wird circa 10 Prozent der Gebäudewärme über Wärmenetze geliefert, eine Steigerung auf etwa 23 Prozent ist möglich“ (Ahmels, 2017). Weiter heißt es dort: „Zudem sollte es „Fremderzeugern“ erlaubt sein, erneuerbare-Energien-Wärme in bestehende Netzinfrastrukturen einzuspeisen und dafür eine Vergütung zu erhalten.“ Auch der WWF schreibt, dass Fernwärme „insbesondere in Großstädten mit entsprechend hoher Verdichtung [...] auch in Zukunft eine zentrale Rolle bei der Dekarbonisierung des Gebäudesektors spielen [wird]“ (WWF Deutschland, 2017).

Der Bundesverband Erneuerbare Energie (BEE) setzt vor allem auf die Dekarbonisierung der Wärmenetze – das Thema Ausbau wird dort nicht weiter thematisiert (vgl. Sieberg et al. (2016), BEE (2018)). Für den AGFW ist der „Ausbau der Fernwärmeversorgung [...] in erster Linie eine Investition in eine Infrastruktur anstatt in eine Erzeugungstechnologie, wodurch die Möglichkeit besteht, mittelfristig auf sich ändernde energiepolitische Herausforderungen zu reagieren“ (AGFW, 2015). Weiterhin heißt es dort: „Langfristig, d.h. bis zum Jahr 2050, könnten die 70 einwohnerstärksten Städte in Deutschland ihr Ziel, im Bereich der Wärmeversorgung der Wohn- und Nichtwohngebäude klimaneutral zu sein, erreichen durch die Umsetzung der in den Klimaschutzkonzepten der Städte bereits aufgeführten Maßnahmen des Ausbaus der Fernwärmeversorgung“. Ein Ausbau der Fernwärme wird hier also ausdrücklich als zielkompatibel angesehen. Auch unterstützen viele Stadtwerke einen weiteren Ausbau der von ihnen betriebenen Fernwärmenetze, so z.B. die Stadtwerke München GmbH oder die Mainova AG. Der Bundesverband der Energie- und Wasserwirtschaft (BDEW) sieht – neben den Gasnetzen – auch Wärmenetze als „entscheidende Infrastruktursysteme für die Erreichung der Beiträge, die der Wärmemarkt zur Erfüllung des Klimaschutzziels und für die Energiewende leisten muss“ (BDEW, 2017b). Weiter heißt es dort, dass die „Wärmewende [...] in dicht besiedelten Regionen und städtischen Gebieten nur mit Hilfe der Sammel- und Verteilfunktion der Wärmenetzsysteme und des Erdgasnetzes funktionieren [wird], da große Flächen für die Erzeugung von Wärme aus Erneuerbaren Energien [...] vor Ort fehlen.“ Gleichzeitig „muss [es] den Betreibern der Wärmeversorgungssysteme überlassen bleiben, wie eine zukunftsfähige Ausgestaltung der Wärmenetze – unter den Bedingungen der Versorgungssicherheit und Wirtschaftlichkeit – vorgenommen wird“ (BDEW, 2017b).

Bei Verbänden, die nicht explizit mit Wärmenetzen zu tun haben, werden diese auch in einschlägigen Strategiepapieren nicht erwähnt (so z.B. DVGW (2014)). Eine Studie im Auftrag von IWO, BDH, ZVSHK, DEPV, HKI und IPS hat gezielt die Wirtschaftlichkeit von dezentralen Versorgungssystemen gegenüber zentralen Versorgungssystemen untersucht und kommt zu dem Schluss, dass eine „Sanierung mit dezentralen Heizungssystemen [...] in allen untersuchten Gebäudevarianten und Versorgungsgebieten wirtschaftliche Vorteile gegenüber einer Sanierung mit zentralen, wärmenetzgebundenen Versorgungssystemen [bietet]. Je größer die durch die Heizung einzusparende Energiemenge ist,

desto größer wird ceteris paribus der Vorteil moderner und effizienter dezentraler Wärmesysteme gegenüber den zentralen Wärmenetzen“ (Oschatz et al., 2016). Weiter heißt es dort: „Aus [...] gesamtwirtschaftlicher Sicht führt die Umstellung von einer dezentralen Wärmeversorgung auf eine Nah- und Fernwärmeversorgung in den betrachteten Fällen zu deutlichen Preissteigerungen bei der Wärmeversorgung. Hingegen führt die dezentrale Erneuerung der Wärmesysteme in jedem der hier untersuchten repräsentativen Fälle [...] zu einer deutlichen Reduzierung der Wärmekosten“. Hierzu ist allerdings anzumerken, dass in der Studie die Investitionskosten sowohl im Falle der dezentralen Anlagen, als der zentralen Wärmenetze über jeweils 20 Jahre abgeschrieben werden, obwohl Wärmenetze typischerweise deutlich längere Lebensdauern aufweisen als dezentrale Einzelanlagen. Dies führt in der Studie dazu, dass die Gesamtkosten für die zentrale Wärmebereitstellung ungleich höher liegen. Auch Handwerkskammern sehen den Ausbau der Fernwärme zum Teil kritisch, da beispielsweise durch einen Anschlusszwang eine Monopolstellung etabliert wird. Laut der Fachzeitschrift für technische Gebäudeausstattung (TGA Fachplaner) erfüllen Fernwärmeprojekte im Ausbau „nur eine Übergangsfunktion“, deren „Ausbaupläne [...] schon heute infrage zu stellen [sind]“ (Jagnow & Wolff, 2011). In den Wahlprogrammen der einschlägigen Parteien für die Bundestagswahl 2017 findet sich nur bei Bündnis 90/Die Grünen ein Hinweis zu Wärmenetzen: „Wir wollen die Nutzung erneuerbarer Wärme im Gebäudebestand voranbringen, die energetische Modernisierung von Häusern und ganzen Stadtvierteln fördern sowie Nahwärmenetze und Abwärmennutzung ausbauen“ (Bündnis 90 / Die Grünen, 2017).

### 3.2.3. Verbot neuer fossiler Heizungen ab 2030 vs. Technologieoffenheit

Tabelle 15: Übersicht Ausgestaltungsmöglichkeiten Ausstieg aus fossilen Heizungstechnologien (Quelle: Eigene Darstellung)

Möglichkeit	Beschreibung	Pro	Contra
Verbot neuer fossiler Heizungen ab 2030	Zur Wärmeerzeugung werden ab 2030 keine neu verbauten Heizkessel auf Basis fossiler Energieträger mehr zugelassen  <u>Herausforderung:</u> Die Wärmebereitstellungs-Technologie trifft nicht zwangsläufig eine Aussage über den Brennstoff -> auch Biogas oder synthetische Gase können in einem Gasbrennwertkessel zur Wärmebereitstellung genutzt werden	Um die Ziele zu erreichen und Lock-in Effekte zu vermeiden, ist eine frühzeitige Umstellung auf Technologien mit erneuerbaren Energieträgern unverzichtbar  Brennstoffe auf Basis erneuerbarer Energien werden 2030 noch nicht in dem Umfang zur Verfügung stehen, dass fossile Brennstoffe in genügendem Ausmaß ersetzt werden können; gleiches könnte für 2050 gelten; hinzu kommt Sektorkonkurrenz um die synthetischen Brennstoffe	Technologische Entwicklungen, etwa eine Effizienzsteigerung bei herkömmlichen Heizungstechnologien oder bei der Herstellung von synthetischen Brennstoffen, könnten ein Verbot zu drastisch erscheinen lassen  Akzeptanzhürden?  Großer Strukturbruch im Heizungsinstallationsmarkt
Technologieoffenheit	Kein direkter ordnungsrechtlicher Eingriff/keine direkten Vorgaben hinsichtlich der zu nutzenden Heizungstechnologie (allerdings werden EnEV/EEWärmeG bzw. irgendwann das GEG Vorgaben hinsichtlich der EE-Anteile oder des CO <sub>2</sub> -Verbrauchs machen)	Eigentümer können selbst entscheiden  Weniger staatliche Vorgaben/Bürokratie	Führt ggf. zu Lock-in Effekten  Könnte Zielerreichung 2050 gefährden  Pfad könnte anfangs kostengünstig sein, aber in den letzten Jahren bis 2050 mit gestiegenem Zielerreichungsdruck teuer werden
<b>Unsicherheiten und externe Treiber</b>			
Energiepreise			
Kosten eingesetzter Techniken			
„Verfügbarkeiten“ (Anzahl Fach-Handwerker, Stückzahlen Wärmepumpen, Solarthermieanlagen, Biomasse)			
Entwicklungen bei der Power-to-gas Technologie			
Entwicklungen bei den Energie-Importen			
Wechselwirkungen mit anderen Richtungsentscheidungen			
Power-to-Gas (vgl. Kapitel Konventionelles Erdgas vs. Gasnetz als Langzeitspeicher)			
Rolle von Power-to-heat (Kapitel Verstärkter vs. begrenzter Einsatz von Power-to-Heat Technologien)			

## Fragestellung/Problemaufriss

Im Vergleich zu anderen Sektoren ist der Wärmesektor gekennzeichnet durch lange Investitionszyklen und eine gewisse Trägheit. Um die klimapolitischen Ziele zu erfüllen müssen deshalb rechtzeitig Pfade beschritten werden, die eine Zielerreichung überhaupt ermöglichen. Heizungstechnologien haben typischerweise eine Lebensdauer von 15 bis 20 Jahren (Agethen et al., 2008). Die angepeilte Dekarbonisierung im Jahr 2050 setzt also voraus, dass ab 2030 und spätestens ab 2035 keine Heizkessel auf Basis fossiler Energieträger mehr verbaut werden sollten. Andere europäische Länder wie Dänemark (Danish Ministry of Climate, Energy and Building, 2012) oder die Niederlande<sup>6</sup> sind diesen Schritt schon jetzt gegangen und haben beschlossen deutlich vor 2030 keine neuen Öl- und Gasheizungen in neuen Gebäuden oder Bestandsgebäuden zuzulassen.

Allerdings ist es wichtig, zwischen Heizungstechnologie und dem verwendeten Energieträger zu unterscheiden. So kann ein Gaskessel sowohl mit Erdgas als auch Biogas oder synthetisch hergestelltem Gas auf Basis erneuerbarer Energien betrieben werden. Allerdings ist es fraglich, ob 2050 Biogas und synthetische Gase in dem Maße zur Verfügung stehen werden, um Gaskessel mit dekarbonisierten Gasen betreiben zu können. Hier lauert unter Umständen die Gefahr, auf eine Technologie zu setzen, die am Ende nicht klimaneutral betrieben werden kann.

## Beschreibung der Ausgestaltungsmöglichkeiten

Die hier gewählten Ausgestaltungsvarianten beschränken sich auf zwei mögliche Ausgestaltungsvarianten: zum einen ein Verbot neuer fossil betriebener Heizungstechnologien ab 2030, zum anderen komplette Technologieoffenheit bezüglich der Wahl der Heizungstechnologie (in den Grenzen von EnEV/EEWärmeG bzw. GEG).

### *Verbot neuer fossil betriebener Heizungstechnologien*

In dieser Ausgestaltungsvariante wird der Einbau neuer Öl- oder Gaskessel ab 2030 ordnungsrechtlich verboten. Gebäudeeigentümer wären in der Folge damit konfrontiert, sich für eine Heizungstechnologie auf Basis erneuerbarer Energien entscheiden zu müssen, beispielsweise Pellet-Kessel, elektrische Wärmepumpen oder Kombinationen daraus (ggf. mit Solarthermie-Unterstützung). Mit derzeit jährlich ca. 700.000 neu eingebauten Heizungsanlagen<sup>7</sup>, von denen in den vergangenen Jahren über 80% mit Heizöl oder Erdgas betrieben wurden, stünde bei dieser Ausgestaltungsvariante ein deutlicher Strukturbruch im Heizanlageninstallationssektor bevor.

Diese Variante dürfte den Gebäudesektor dem Ziel eines nahezu klimaneutralen Gebäudebestands deutlich näher bringen. Lock-in Effekte durch nach 2030 verbaute Heizungen auf Basis fossiler Brennstoffe würden vermieden. Je nach gewähltem Zielzustand, könnte das Einbauverbot auch früher (bei Zielzustand THG -95%) oder später (Zielzustand THG -80%) gesetzt werden. Dabei sind auch die insgesamt begrenzten THG-Budgets zu berücksichtigen. Gleichzeitig ist in dieser Variante damit zu rechnen, dass Gebäudeeigentümer einerseits vor Beginn des Einbauverbots verstärkt auf (bekannte) Kessel, die noch mit fossilen Energieträgern befeuert werden dürfen, setzen werden, bzw. dass nach Inkrafttreten des Verbots zunächst weniger Heizungstausche stattfinden werden (Attentismus).

### *Technologienoffenheit*

In dieser Variante werden keine Technologien per se ausgeschlossen oder verboten. Vielmehr wird es dem Markt und den Eigentümern überlassen, für welche Heizungstechnologie sie sich entscheiden. Somit ist es nach wie vor möglich sich auch im Jahr 2030 einen Kessel einzubauen, der mit fossilen Brennstoffen betrieben wird. Über die Jahre bis zum Zieljahr 2050 besteht die Möglichkeit, den verwendeten Brennstoff durch Brennstoffe auf Basis erneuerbarer Energien zu ergänzen bzw. ihn ganz dadurch zu ersetzen.

Da die Potenziale für Brennstoffe auf Basis erneuerbarer Energien allerdings aller Wahrscheinlichkeit nach beschränkt sein werden (vgl. Kapitel 3.4), könnte diese Variante einerseits dazu führen, dass die CO<sub>2</sub>-Minderungsziele im Jahr 2050 verfehlt werden, weil weiterhin mit fossilen Brennstoffen geheizt wird. Andererseits könnte es, um die Ziele doch noch zu erreichen, passieren, dass die Kessel vor dem Ende ihrer technischen Lebensdauer gegen Heizanlagen auf Basis erneuerbarer Energien ausgetauscht werden müssen, was die Kosten der betroffenen Eigentümer u.U. erhöhen wird.

---

<sup>6</sup> <https://www.enbausa.de/heizung/aktuelles/artikel/niederlande-verbieten-neue-gasheizungen-5868.html>

<sup>7</sup> [http://www.bdh-koeln.de/fileadmin/user\\_upload/Daten\\_Fakten/Marktentwicklung\\_2008-2017\\_DE.pdf](http://www.bdh-koeln.de/fileadmin/user_upload/Daten_Fakten/Marktentwicklung_2008-2017_DE.pdf)

## Gegenüberstellung der Ausgestaltungsmöglichkeiten

Ein Verbot würde die Wahrscheinlichkeit der Zielerreichung im Jahr 2050 erhöhen, allerdings käme es für die Hersteller und Installateure von Gas- und Ölkesseln nahezu einem Komplettenzug ihres Geschäftsmodells gleich. Der deutliche Strukturbruch beim Einbau neuer Heizanlagen wäre nicht nur für diejenigen schwer zu bewältigen, die ihr bisheriges Geschäftsmodell verlieren, sondern auch für diejenigen, die die alternativen Heizanlagen einbauen müssten. Jochum et al. (2017) schreiben beispielsweise, dass der Wärmepumpenmarkt aller Voraussicht nach bis 2030 max. 200.000 Anlagen zur Neu-Installation bereitstellen kann. Nimmt man an, dass dies auch für die anderen noch erlaubten Heiztechnologien zutrifft, so scheint es unerlässlich, langfristig planbare Übergangsfristen für alle Beteiligten zu setzen.

Beide Varianten haben klare Vor- und Nachteile. So ist die klimapolitische Zielerreichung für 2050 in der Ausgestaltungsvariante mit Einbauverbot vermutlich eher zu erreichen als in der Variante mit Technologieoffenheit. Hinsichtlich der Kosten der beiden Varianten ist aufgrund der vielfältigen Abhängigkeiten und des großen Zeiträume nicht leicht vorhersehbar, welche Variante die günstigere sein wird: die Verbots-Variante würde vermutlich anfangs höhere Kosten verursachen. Die Technologie-offene Variante läuft allerdings bei ungenügender Ausgestaltung Gefahr, die klimapolitischen Ziele zu verfehlen, was kurz vor 2050 wiederum zu ggf. kostspieligen Sofortmaßnahmen führen könnte, um die Ziele doch noch zu erreichen.

Grundsätzlich sind die Rahmenbedingungen ein großer Unsicherheitsfaktor bei der Bewertung der beiden Ausgestaltungsvarianten. So würde die Einführung einer CO<sub>2</sub>-Steuer (oder eines anderen Instruments zur Verteuerung des CO<sub>2</sub>-Ausstoßes) bei entsprechender Ausgestaltung bis 2050 vermutlich auch in der Technologie-offenen Variante dazu führen, dass die klimapolitischen Ziele erreicht würden. Ggf. geschieht dies in der Technologie-offenen Variante sogar kostenoptimaler. Zudem würde ein zu starker Strukturbruch verhindert und – vorausgesetzt es gibt eine langfristig geplante Einführungsphase der Verteuerung von CO<sub>2</sub>-Emissionen – die beteiligten Akteure könnten sich auf die geänderten Rahmenbedingungen einstellen.

## Stakeholder-Positionen

Die verschiedenen Stakeholder vertreten unterschiedliche Auffassungen bezüglich der Erreichung der energie- und klimapolitischen Ziele. Auf Seiten der Verbände gibt es einerseits eine klare Positionierung für Technologieoffenheit (vgl. z.B. BDEW (2017a), BDH et al. (2017)). Der DVGW setzt verstärkt auf Gas und Energieeffizienz: „Zunächst sollten der ideale Mix aus einem Fuel-Switch, also der Ablösung von Kohle und Erdöl durch Gase als Energieträger der Wärmebereitstellung, und die Durchführung von Modernisierungsmaßnahmen im Vordergrund stehen.“ (DVGW, 2017c), (DVGW, 2017b). Zukunft Erdgas vertritt darüber hinaus die Ansicht, dass Gas in absehbarer Zeit auf Basis erneuerbarer Energien zur Verfügung stehen wird und die Gasinfrastruktur somit weiterhin ein wichtiger Bestandteil des Energiesystems bleiben wird (Zukunft Erdgas e.V., 2017).

Andererseits gibt es Verbände, die klare Zielvorstellungen in eine andere Richtung vertreten. So fordert der BEE den Anteil erneuerbarer Energien am Raumwärme- und Warmwasserverbrauch bis 2040 auf 100% zu erhöhen sowie ab 2018 die staatliche Förderung fossiler Anlagen zu streichen, um Lock-in Effekte zu vermeiden (BEE, 2017b). Auch der BWP sieht „Möglichkeiten, verschärfte Anforderungen an den Austausch von fossilen Heizgeräten zu stellen. Bspw. könnte die Austauschverpflichtung (EnEV § 10) auf Niedertemperatur-Kessel ausgeweitet [...] werden“ (Bundesverband Wärmepumpe, 2016). Seitens der Politik sieht die Bundesregierung im Klimaschutzplan folgenden Meilenstein im Jahr 2030: „[Es muss] eine deutliche Reduzierung der direkten Verbrennung fossiler Energieträger zur Bereitstellung von Raumwärme und Warmwasser [erfolgen]. Dabei können in einer Übergangsphase hocheffiziente Brennwertkessel, die ausschließlich fossile Energien nutzen, einen wichtigen Beitrag zur Effizienzsteigerung, Energieversorgung und zur Emissionseinsparung leisten. Um „Lock in-Effekte“ zu vermeiden, werden die Förderbedingungen so gestaltet, dass die Nutzung von Heizsystemen, die erneuerbare Energien nutzen, deutlich attraktiver ist, als die Nutzung von Heizsystemen auf Basis fossiler Energien“ (BMUB, 2016).

In den Parteiprogrammen zur Bundestagswahl 2017 finden sich mehrere Aussagen zum Thema Technologieoffenheit. Während im CDU Wahlprogramm einerseits klar gestellt wird, dass „langfristig [...] ein großer Teil der fossilen Energien wie Kohle, Öl und Gas durch umweltfreundliche Energien ersetzt werden [muss]“, werden „dirigistische staatliche Eingriffe in diesem Bereich“ abgelehnt und „auf markt-

wirtschaftliche Instrumente“ gesetzt (CDU, 2017). Ähnlich hält es die SPD, die schreibt: „[Wir setzen] auf Technologieneutralität und Innovationsoffenheit“ (SPD, 2017). Die FDP verweist darauf dass „niemand [...] heute sagen [kann], wie die Energieversorgung in 50 Jahren aussehen wird. Daher lehnen wir langfristige Pläne, mit denen für jeden Wirtschaftssektor spezifische Emissionsziele mittels restriktiver Vorgaben umgesetzt werden sollen, grundsätzlich ab“ (FDP, 2017a). Bündnis 90/Die Grünen fordern zwar einen Anteil von 100% erneuerbare Energien im Stromsektor und nur noch Neuzulassungen von abgasfreien Autos im Jahr 2030, allerdings findet sich in ihrem Wahlprogramm keine vergleichbare Aussage für Heizungstechnologien (Bündnis 90 / Die Grünen, 2017).

### 3.2.4. Verstärkter vs. begrenzter Einsatz von Power-to-Heat Technologien

Tabelle 16: Übersicht Ausgestaltungsmöglichkeiten Power-to-heat im Gebäudebereich (Quelle: Eigene Darstellung)

Möglichkeit	Beschreibung	Pro	Contra
Verstärkter Einsatz von PtH Technologien	<p>Zur Wärmeerzeugung werden verstärkt strombetriebene Heiztechniken verwendet, dazu zählen vor allem Wärmepumpen, aber auch Heizstäbe</p> <p><u>Voraussetzungen:</u> viel Effizienz, da restliche erneuerbaren Potenziale im Wärmebereich begrenzt sind und auch die Stromverfügbarkeit für den Wärmesektor beschränkt sein wird</p> <p><u>Herausforderungen:</u> genügend Strom, der dem Wärmesektor zur Verfügung steht; strombasierte Wärmenachfrager sollten vor allem dann laufen, wenn viel EE Strom im Netz ist</p>	<p>Klassische Erneuerbaren-Potenziale im Wärmesektor sind begrenzt (Solarthermie, Biomasse)</p> <p>Strom insgesamt leichter zu dekarbonisieren, deshalb sinnvoll verstärkt im Wärmesektor einzusetzen</p> <p>Flexibilitätsoption sowohl für den Strom- als auch den Wärmesektor: allerdings nur bei bivalenten Heizungssystemen und/oder großen Wärmespeichern, ansonsten entstehen zusätzliche Inflexibilitäten</p>	<p>steht überhaupt genug Strom für den Wärmesektor zur Verfügung?</p> <p>Zunächst muss der Stromsektor selber dekarbonisiert werden und es besteht Sektorkonkurrenz um den darüber hinaus benötigten Strom mit den Verkehrs- und Industriesektoren</p> <p>Strom sollte als höher exergetischer Energieträger nur unter bestimmten Voraussetzungen in Wärme gewandelt werden</p>
Begrenzter Einsatz von PtH Technologien	<p>PtH Anwendungen kommen nur moderat zum Einsatz</p> <p><u>Herausforderung:</u> Die Wärmeversorgung auch ohne große Stromanteile dekarbonisieren</p>	<p>Erneuerbarer Strom sollte zunächst im Stromsektor eingesetzt werden, um diesen zu dekarbonisieren</p> <p>Es steht mehr Strom für andere Sektoren zur Verfügung, die ggf. schwerer zu dekarbonisieren sind als der Wärmesektor</p>	<p>Klassische Erneuerbaren-Potenziale im Wärmesektor sind begrenzt (Biomasse, Solarthermie)</p> <p>Erhöht den Druck verstärkt Biomasse zu importieren</p>

#### Unsicherheiten und externe Treiber

Energiepreise

Kosten eingesetzter Techniken

#### Wechselwirkungen mit anderen Richtungsentscheidungen

Betrachtung Biomasse/Höhe Biomasseimporte/Biomasse-Sektorallokation (Kapitel Bioenergie im Stromsektor vs. Wärmesektor vs. Verkehrssektor)

Höherer Strombedarf infolge stärkeren Wärmepumpeneinsatzes (Kapitel Sektorübergreifende Fragestellungen)



## Fragestellung/Problemaufriss

Da der erneuerbare Energien Anteil an der Stromerzeugung schon deutlich höher liegt als der erneuerbare Energien Anteil an der Wärmeversorgung, wird in der verstärkten Verwendung von Power-to-heat Technologien eine wesentliche Möglichkeit gesehen, den erneuerbaren Energien Anteil an der Gebäude-Wärmeversorgung zu erhöhen. Power-to-heat Technologien reichen von den klassischen Widerstandsheizungen (z.B. Nachtspeicheröfen) über verschiedene elektrisch betriebene Wärmepumpen (Luft/Luft, Luft/Wasser, Sole/Wasser) zu Heizstäben, Lüftungsheizungen mit elektrischem Heizdraht oder Infrarot-Heizungen.

Fraglich ist, wie viel zusätzlicher Strom im zukünftigen Energiesystem für den Wärmesektor zur Verfügung stehen wird. Denn eine Dekarbonisierung aller Sektoren mittels „Power-to“-Anwendungen erscheint aus heutiger Sicht unrealistisch. Neben der Dekarbonisierung des klassischen Stromsektors hoffen nämlich sowohl der Wärme-, der Verkehrs- sowie der Industriesektor auf Strom auf Basis erneuerbarer Energien, um ihren jeweiligen Sektor zu dekarbonisieren (vgl. Kapitel Sektorkopplung Elektrifizierung vs. synthetische Brennstoffe). Vor diesem Hintergrund scheint es vor allem nötig, den zur Verfügung gestellten Strom möglichst effizient zu nutzen und auch bei den möglichen Wärme-Technologien eine Art Nutzungs-Hierarchie zu erarbeiten.

## Beschreibung der Ausgestaltungsmöglichkeiten

In diesem Kapitel werden zwei Ausgestaltungsvarianten für die Durchdringung der Power-to-heat Technologien im Gebäudebereich näher betrachtet: zum einen eine Variante, in der verstärkt auf Power-to-heat gesetzt wird mit hohen Anteilen an Strom im Wärmesektor; zum anderen wird eine Ausgestaltungsvariante beleuchtet, in der der Einsatz von Power-to-heat Anwendungen gegenüber heute nur moderat ansteigt.

### *Verstärkter Einsatz von Power-to-heat Technologien*

In dieser Variante werden zur Wärmeerzeugung verstärkt strombasierte Heizungstechnologien verwendet. Dazu zählen vor allem elektrische Wärmepumpen, aber auch Heizstäbe und Lüftungsheizungen. Im Sinne von „efficiency first“ werden in dieser Variante alte Widerstandsheizungen (Nachtspeicheröfen) durch andere Heizungen ersetzt, da beispielsweise Wärmepumpen mit der gleichen Strommenge drei- bis viermal so viel Nutzwärme bereit stellen können<sup>8</sup>. Wärmepumpen sind im Gebäudebereich vielfältig einsetzbar, sollten allerdings vor allem in Gebäuden eingesetzt werden, deren Heizungsverteilsysteme mit niedrigen Vorlauftemperaturen auskommen (vgl. (Hesse, 2016)). Lüftungsheizungen sollten als günstige Heizungsvariante nur in sehr gut gedämmten Häusern (z.B. Passivhäusern) verwendet werden, da ihr Wirkungsgrad im Verhältnis zu Wärmepumpen sehr gering ist. Heizstäbe können als Ergänzungsheizung in Pufferspeichern bzw. in Speichern von Wärmenetzen genutzt werden (Koch et al., 2017). Wo dies möglich ist, sind Wärmepumpen als Power-to-heat Technologie zu bevorzugen.

Die Herausforderungen dieser Ausgestaltungsvariante sind vielfältig: zunächst einmal muss überhaupt genügend Strom (auf Basis erneuerbarer Energien) erzeugt werden, der dann dem Wärmesektor zur Verfügung stehen kann. Dies bedeutet vor allem einen stärkeren Ausbau der PV- und Wind-Erzeugungskapazitäten. Oder andersherum gesprochen: wenn mehr PtH gewünscht wird, muss auch mehr Stromerzeugung auf Basis erneuerbarer Energien erfolgen. Eine weitere Herausforderung stellt die Umstellung der Heizverteilsysteme innerhalb der Gebäude auf niedrige Vorlauftemperaturen dar: hierzu bedarf es meist neuer Heizkörper/Radiatoren, die mit geringeren Vorlauftemperaturen und größeren Oberflächen die gleiche Nutzwärme an den Raum abgeben können. Im Vergleich zum Einsatz einer Wärmepumpe ist eine günstige, aber weniger effiziente Variante von PtH der Einbau eines Heizstabs in einen Pufferspeicher. Dieser kann allerdings nur als Unterstützung der Hauptheizung betrachtet werden und sollte idealerweise nur in Situationen anspringen, in denen ausreichend Strom auf Basis erneuerbarer Energien im Netz ist. Aus Sicht der Stromerzeugung ist dies ein ganz wichtiger Punkt: letztlich sollten zusätzliche Stromverbraucher nur dann Strom nutzen, wenn dieser erneuerbar und in genügender Menge produziert wird (Koch et al., 2017). Allerdings gibt es aus der Wärmeperspektive wenig Spielraum für eine zeitliche Verschiebung des Wärmebedarfs. Hier könnten größere Pufferspeicher ein wenig Abhilfe schaffen, aber auch deren Bereitstellung von Flexibilität im Gesamtsystem ist begrenzt.

---

<sup>8</sup> Für eine Bewertung von Nachtspeicheröfen siehe auch Heinemann et al. (2014).

### *Begrenzter Einsatz von Power-to-heat Technologien*

In dieser Ausgestaltungsvariante werden die verschiedenen Power-to-heat Technologien weniger stark ausgebaut. In der Folge besteht einerseits ein geringerer Ausbaudruck auf die erneuerbaren Energien im Stromsektor. Andererseits erhöht sich der Druck auf die verbleibenden Wärmeenergieträger: so müssen in dieser Variante vor allem die Biomasse und die Solarthermie größere Beiträge leisten. Auch eine Intensivierung der Aktivitäten zur energetischen Gebäudesanierung bzw. ambitioniertere Neubaustandards können in dieser Variante helfen, die klimapolitischen Ziele zu erreichen. Ein THG-Reduktionspfad von -95% bis zum Jahr 2050 wird allerdings aller Voraussicht nach das komplette Portfolio an Maßnahmen ausschöpfen müssen. Und es bleibt fraglich, ob die vorhandenen Potenziale für Biomasse und Solarthermie (und in geringerem Umfang Tiefengeothermie) überhaupt ausreichen, die Wärmeversorgung ohne wesentliche Anteile an Strom im Wärmebereich im Jahr 2050 zu decken (vgl. Jochum et al. (2017)). Ein mögliches Entspannungsventil stellen bei dieser Ausgestaltungsvariante sicherlich Biomasse Importe dar.

In dieser Variante werden folglich verstärkt Zielkonflikte bei der Sektorallokation der Biomasse entstehen. Ggf. gilt dies auch für die Dachflächennutzung: hier würde mehr Solarthermie gleichzeitig weniger PV bedeuten. Widerstände sind auch im Bereich der verstärkten energetischen Gebäudesanierung zu erwarten – die Hemmnisse in diesem Bereich sind in Kapitel 3.2.1 näher beschrieben. Weniger Strom im Wärmebereich bedeutet aber auch mehr Strom für die anderen Sektoren wie Verkehr oder Industrie.

### **Gegenüberstellung der Ausgestaltungsmöglichkeiten**

Wie oben beschrieben führt die Variante mit einem verstärkten Einsatz von Power-to-heat Technologien zu einem höheren Zubaubedarf erneuerbarer Stromerzeugungskapazitäten. Gleichzeitig wird der Strombedarf vor allem in den Wintermonaten stark ansteigen, weil dort der Wärmebedarf am höchsten ist. Die Variante mit weniger ausgeprägtem Einsatz von Power-to-heat Technologien verschafft dem Stromsektor deshalb höhere Freiheitsgrade. Dabei sinken aber gleichzeitig die Freiheitsgrade im Bereich der verbleibenden erneuerbaren Wärmequellen wie Solarthermie, Biomasse und Tiefengeothermie – alles Wärmequellen, die ihre eigenen Einsatzgrenzen haben, seien sie zeitlicher und räumlicher Natur, oder das Gesamtpotenzial betreffend. Eine „no regret“ Maßnahme, die beide Ausgestaltungsvarianten hinsichtlich der beschränkten Wärmequellen-Potenziale unterstützen würde, ist eine verstärkte und ambitionierte Umsetzung von Gebäudesanierungen im Sinne des „efficiency first“ Prinzips. Beide Ausgestaltungsvarianten haben das Potenzial die klimapolitischen Ziele zu erreichen, wenngleich auch zu vermutlich unterschiedlichen Kosten und konfrontiert mit unterschiedlichen Hemmnissen, die zum jetzigen Zeitpunkt schwer abzusehen sind.

### **Stakeholder-Positionen**

In der Wissenschaftslandschaft gibt es diverse Studien, die Szenarien mit einem deutlichen Ausbau von vor allem Wärmepumpen als effizientester direkt betriebener Power-to-heat Technologie beschreiben. Dazu gehören Studien des Fraunhofer ISE (Henning & Palzer, 2015), des Fraunhofer IWES (Fraunhofer IWES/ IBP, 2017) oder weiterer Institute (z.B. Bürger et al. (2017)). Selbst eine Studie im Auftrag des BDI geht in einem 95% CO<sub>2</sub>-Reduktionsszenario von einem Wärmepumpenanteil an der Gebäudewärmebereitstellung im Jahr 2050 von über 50% aus (Gerbert et al., 2018). Andere Studien gehen von insgesamt noch mehr zusätzlichem Strom auf Basis erneuerbarer Energien aus, so dass dort der Strom nicht nur direkt, sondern vor allem auch indirekt mittels synthetischer Gase im Wärme-sektor bereitgestellt werden kann (ewi Energy Research & Scenarios, 2017). Nur Szenarien mit äußerst ambitionierten Sanierungsraten und -tiefen erreichen Anteile von Wärmepumpen am Endenergieverbrauch der Wärmeversorgung von unter 30% (vgl. Thamling et al. (2015) oder Bürger et al. (2017)).

Für den FVEE liegt die Rolle von Power-to-heat Technologien derzeit vor allem darin, das Abschalten von PV- oder Windenergieanlagen im Rahmen des Einspeisemanagements zu vermeiden (FVEE, 2015). Im Hinblick auf mögliche Regelungen wird hervorgehoben, dass sichergestellt sein muss, dass „nur Überschussstrom verheizt wird und nicht etwa ein zusätzlicher, aus konventionellen Kraftwerken zu deckender Strombedarf generiert wird“ (FVEE, 2015).

Der AGFW sieht Power-to-heat im Zusammenhang mit KWK-geführten Fernwärmesystemen als eine hocheffiziente und kostengünstige Technologie der Sektorenkopplung von Strom und Wärme, die es

ermöglicht, Überschüsse an erneuerbarem Strom nachhaltig aufzunehmen und den Netzausbau vorerst zu entlasten (Kühne, 2016).

In den Wahlprogrammen der einschlägigen Parteien zur Bundestagswahl 2017 findet sich nur bei Bündnis 90/Die Grünen eine Aussage zur Nutzung von Strom im Wärmebereich: „Durch eine Reform des Strommarktes schaffen wir neue Anreize dafür, Energie flexibel und effektiv dann zu nutzen oder zu speichern, wenn viel Strom aus Sonne und Wind verfügbar ist. Zu diesen Zeiten wollen wir Speicher auffüllen oder Strom in Wärme oder Gas umwandeln, um damit Wohnungen zu heizen oder Fahrzeuge anzutreiben“ (Bündnis 90 / Die Grünen, 2017).

Insgesamt fällt bei den Stakeholder Meinungen auf, dass vor allem auf die Verwendung von Überschussstrom Bezug genommen wird, nicht aber auf das Ziel der Dekarbonisierung des Wärmesektors.

### 3.3 VERKEHRSSSEKTOR

Auf den Verkehrssektor entfallen heute 28% des Endenergiebedarfs und etwa 18% der Treibhausgasemissionen. Die notwendige **Treibhausgasminde** rung von 80 bis 95% bis zum Jahr 2050 kann ohne einen signifikanten Beitrag des Verkehrssektors nicht erreicht werden. Im Klimaschutzplan der Bundesregierung ist daher erstmals ein Sektorziel für den Verkehr festgelegt worden. Er muss seine CO<sub>2</sub>-Emissionen bis 2030 um 40 bis 42% gegenüber 1990 reduzieren (Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit, 2016). Im Rahmen des Energiekonzepts hat sich die Bundesregierung das Ziel gesetzt, den Endenergiebedarf des Verkehrssektors gegenüber 2005 bis zum Jahr 2020 um 10% und bis zum Jahr 2050 um 40% zu senken (BReg, 2010). Die Dekarbonisierung des Verkehrs birgt jedoch besondere Herausforderungen, da sie in sehr kurzer Zeit ein Umdenken sowie ambitioniertes politisches und gesellschaftliches Handeln erfordert. Denn laut der Prognosen rechnet das Bundesverkehrsministeriums (BMVI) bisher mit einer weiteren Zunahme des Verkehrsaufkommens und des motorisierten Verkehrs im Personen- und Güterverkehr (Schubert et al., 2014).

In mehreren sektorübergreifenden Szenarien wie den Klimaschutzszenarien 2050 des BMUB (KS 80 und KS 95) (Repenning et al., 2015a), dem Zielszenario der Energierferenzprognose des BMWi (Schlesinger et al., 2014b) oder den Langfristszenarien für die Transformation des Energiesystems in Deutschland (Bernath et al., 2017a) im Auftrag des BMWi wurden bereits Pfade aufgezeigt, wie das Ziel einer THG-Minderung von 80-95% bis 2050 erreicht werden kann. Auch der BDI mit Klimapfade für Deutschland hat vor kurzem eigene Szenarien für eine 80%- bis 95%-ige THG-Minderung vorgestellt (The Boston Consulting Group & Prognos, 2018). Spezifisch auf den Verkehrssektor ausgerichtete Studien wie Renewbility (Zimmer et al., 2016b) oder die Verkehrsprognose 2030 (Schubert et al., 2014) ergänzen den Forschungsstand um relevante Detailanalysen für den Verkehrssektor.

Alle Szenarien basieren auf ähnlichen sozioökonomischen Rahmendaten (leichter Bevölkerungsrückgang, Wirtschaftswachstum). Sie leiten daraus für den Personenverkehr meist einen etwa konstanten bis leichten, weiteren Anstieg des Verkehrsaufwands ab und für den Güterverkehr einen überwiegend starken Zuwachs je nach hinterlegtem BIP-Wachstum.

Dass der Endenergiebedarf bis 2030 und 2050 dennoch in allen Szenarien deutlich sinkt, ist auf die in den Szenarien angenommenen politischen Rahmenbedingungen und den sich daraus ergebenden starken technologischen Effizienzsteigerungen zurückzuführen. Alle Klimaschutz-Szenarien erreichen die Reduktionsziele des Energiekonzeptes (BReg, 2010) bzw. überschreiten diese deutlich. Gemeinsam ist allen Szenarien neben der deutlichen Effizienzsteigerung bei den Fahrzeugen ein hoher Anteil an Elektromobilität. In allen aktuellen Szenarien wird mittlerweile auch eine starke direkte Elektrifizierung durch Oberleitungs-Lkw unterstellt.

Neben den Effizienzsteigerungen der Fahrzeuge als Strategien zur Treibhausgasminde rung werden in gewissem Umfang auch Verkehrsverlagerungen berücksichtigt. Das in den Studien angenommene Potenzial von Verkehrsverlagerungen fällt jedoch meist vergleichsweise niedrig aus. Deutliche Minderungen im Pkw-Verkehr werden nur im KS 95 und in Renewbility III berücksichtigt. Ähnliches ist für die Güterverkehrsnachfrage zu beobachten, die nur in den Klimaschutzszenarien 2050 des BMUB deutlich gedämpft wird. Eine Verlagerung auf den Schienengüterverkehr ist jedoch in den meisten Szenarien als Klimaschutzmaßnahme hinterlegt.

Deutliche Unterschiede zwischen den Szenarien sind bei der Zusammensetzung der Energieträger im Jahr 2050 zu beobachten. Setzen einige Klimaschutzszenarien noch stark auf den Einsatz biogener Kraftstoffe wie die Energierferenzprognose (Schlesinger et al., 2014b) sowie die Langfristszenarien des BMWi (Bernath et al., 2017a), so wird in anderen der Einsatz zum Teil erheblicher Mengen strom-

basierter Kraftstoffe angenommen. Als Konsequenz steigt die Stromnachfrage des Verkehrssektors bis 2050 massiv an.

Die Szenarien setzen also auf unterschiedliche Technologien zur Erreichung der Klimaschutzziele: So haben Biokraftstoffe, strombasierte Kraftstoffe und Oberleitungs-Lkw eine sehr unterschiedliche Bedeutung in den angesprochenen Szenarien. Das zeigt einerseits die Unsicherheit, mit der heute der Einsatz von potentiellen zukünftigen Technologien vorausgesagt werden kann. Andererseits zeigt es auch, dass es sich bei diesen Themen um relevante Pfadentscheidungen handelt, die mit Investitionen in neue Technologien und Infrastrukturen verbunden sind. Aber auch hinsichtlich der Entwicklung der Verkehrsnachfrage v.a. im Personenverkehr sind die in den Szenarien aufgezeigten Strategien sehr unterschiedlich. In den meisten Szenarien wird der Pfad der Minderung des Verkehrsaufkommens und der Verlagerung – wahrscheinlich auch vor dem Hintergrund der politischen Akzeptanz - kaum adressiert. In anderen Szenarien spielt er jedoch eine relevante Rolle zur Erreichung der Klimaschutzziele. Dafür müssen aber die notwendigen Entscheidungen z.B. hinsichtlich Stadtplanung und Infrastruktur, Förderung multimodaler Angebote und Alternativen für den ländlichen Raum frühzeitig angegangen werden.

Die folgenden fünf Entscheidungspunkte für die Zukunft des Verkehrssektors weisen verschiedene Ausgestaltungsmöglichkeiten (Intensität und Zeitpunkt der Transformation) der Zukunft der Mobilität auf. Diese umfassen aus existierenden Szenarien abgeleitete für den Klimaschutz relevante Transformationspfade: die Umstellung auf Fahrzeuge mit alternativen Antrieben, den Umstieg auf eine erneuerbare Energieversorgung, die Verlagerung von Transporten auf Verkehrsträger wie Fahrrad sowie die Vermeidung von Verkehr durch intelligente Stadtplanung, „Sharing“-Angebote und Veränderungen im Konsumverhalten. Im Hinblick auf die Umsetzbarkeit der Transformationspfade, wird dabei untersucht, welche technischen, politischen und gesellschaftlichen Herausforderungen sich ergeben und wie sich verschiedene wichtige Akteure in der Diskussion um diese Pfade positionieren. Auch werden die Wechselwirkungen zwischen einzelnen Entscheidungspunkten aufgeführt.

### **3.3.1. Umstieg auf elektrische Antriebe und / oder Effizienzsteigerung verbrennungsmotorischer Antriebe**

#### **Fragestellung/Problemaufriss**

In den Langfristszenarien für den Klimaschutz gewinnt der elektrische Antrieb zukünftig erheblich an Bedeutung, wobei derzeit verstärkt über batterieelektrische Pkw (BEV/REEV/PHEV)<sup>9</sup> und netzintegrierte Lkw<sup>10</sup> diskutiert wird. Auf einem höheren Kosten- und geringeren Marktniveau sind derzeit Brennstoffzellenfahrzeuge, bei denen ebenfalls elektrische Motoren für den Vortrieb in den Fahrzeugen eingesetzt werden. Der derzeit vorherrschende Verbrennungsmotor nimmt in den langfristigen Zielszenarien im Straßenverkehr einen geringeren Stellenwert ein, obwohl verbrennungsmotorische Lkw im Straßengüterfernverkehr durchaus auch langfristig eine Rolle in einem Klimaschutzszenario spielen können. Als wichtige Stellschraube für die zukünftige Entwicklung des Verkehrssektors leitet sich daraus also die Frage ab, wie schnell und in welchem Umfang der Umstieg vom Verbrennungsmotor auf elektrische Antriebe im Straßenverkehr erfolgt.

Im Gegensatz zum Straßenverkehr stehen bei den Langstreckenrelationen im Flug- und Seeverkehr außer in speziellen Sonderanwendungen aufgrund der geringeren Energiedichte keine elektrischen Antriebsoptionen zur Verfügung (Schmied et al., 2014). Während im Seeverkehr grundsätzlich die Nutzung verschiedener Kraftstoffe möglich ist, gibt es aus heutiger Sicht im Flugverkehr keine alternativen Antriebsoptionen (siehe Diskussion in Abschnitt 3.3.2)<sup>11</sup>.

Unabhängig von der Antriebstechnologie sind Energieeffizienzverbesserungen in allen Langfristszenarien hinterlegt. Die systemischen Unterschiede hinsichtlich der Energieeffizienz der Antriebskonzepte sind jedoch enorm. Batterieelektrische Fahrzeugkonzepte sind aufgrund der höheren Motorwirkungsgrade 2,5 bis 3 Mal so energieeffizient in der Nutzung wie verbrennungsmotorische Fahrzeuge; in Brennstoffzellenfahrzeugen verringert sich dieser Vorteil durch die Wandlungsverluste in der Brennstoffzelle (Stephanos et al., 2017, 2017).

<sup>9</sup> BEV: Battery Electric Vehicle; REEV: Range Extended Electric Vehicle; PHEV: Plug-In Hybrid Vehicle

<sup>10</sup> Netzintegrierten Lkw wird während der Fahrt von außen Strom zugeführt, z.B. über Oberleitungen, die entlang der Autobahn verlaufen.

<sup>11</sup> Die Diskussion der Dekarbonisierungsoptionen im See- und Luftverkehr wird daher im Abschnitt 3.3.2 geführt.

Neben marktgetriebenen Faktoren wie Energie- und Rohstoffpreisen sind die politischen Rahmensetzungen relevant für die Pfadentwicklung der Fahrzeugtechnologien. Anbieterseitig sind die CO<sub>2</sub>-Emissionsstandards für Pkw und zukünftig auch für Lkw auf EU-Ebene entscheidende Lenkungsinstrumente. Hinsichtlich der Kaufentscheidung sind Abgabenelemente wie die Ausgestaltung der Energiesteuer, der Kfz-Steuer und der Dienstwagenbesteuerung maßgebliche Lenkungsinstrumente, aber auch mögliche zukünftige Elemente wie eine Zulassungssteuer oder eine fahrleistungsbasierte Pkw-Maut können je nach Ausgestaltung eine wirkmächtige Lenkungswirkung entfalten (Zimmer et al., 2016a).

Co-Benefits in Bezug auf die Luftschadstofffreisetzung ergeben sich v.a. bei Fahrzeugen mit elektrischen Antrieben. Dementsprechend können auch Lenkungsmaßnahmen zur Reduzierung der Luftschadstofffreisetzung eine Wirkung auf die Marktentwicklung der verschiedenen Antriebskonzepte entfalten. Weiterhin ergeben sich Kostendegressionen bei Effizienztechnologien und bei den neuen Antriebskonzepten v.a. durch eine Skalierung der eingesetzten Technologien. Dementsprechend sind Entscheidungen auf den global größten Fahrzeugmärkten ein Treiber für Entwicklungen auch in Deutschland. Lenkungsentscheidungen in China, den USA und zukünftig auch in Indien können daher allein aufgrund ihrer Marktmächtigkeit eine Wirkung entfalten, die ggf. die Bedeutung von in Deutschland getroffenen Maßnahmen übertreffen.

Im Folgenden wird in Kürze auf die in der folgenden Tabelle genannten möglichen Ausgestaltungsoptionen eingegangen.

*Tabelle 17: Übersicht über Möglichkeiten der Umstellung auf alternative Antriebe (Quelle: Eigene Darstellung)*

<b>Möglichkeit</b>	<b>Beschreibung</b>	<b>Pro</b>	<b>Contra</b>
Kurzfristiger und schneller Umstieg auf elektrische Antriebe	Hoher Anteil batterieelektrischer Pkw (~10 Mio. BEV/REEV/PHEV im Jahr 2030) Rollout stromgeführter Lkw ab 2025 Emissionsfreie Innenstädte ab 2020 Ab 2035/40 keine ICEV-Neuzulassungen mehr	Höchste Energieeffizienz Planungssicherheit für Hersteller Früher Einstieg in Zukunftstechnologie / Marktpositionierung Co-Benefits bei Luftreinhaltung und Lärmreduktion	Frühe Festlegung auf eine Technologie / ggf. Verpassen anderer Lösungsoptionen Hohe Anfangsinvestitionen in Fahrzeuge in kurzer Zeit Schnelle Anpassung von Nutzergewohnheiten erforderlich Schnelle Anpassung von Produktionsprozessen notwendig Kurzfristige Rohstoffengpässe möglich / neue Importabhängigkeiten Vernachlässigung der Effizienzpotenziale bei ICEV
Gradueller Markthochlauf elektrischer Antriebe sowie Effizienzsteigerung bei ICEV	Markthochlauf elektrischer Antriebe durch ambitionierte CO <sub>2</sub> -Zielwerte und weitere Anreizsysteme (~6 Mio. BEV/REEV/PHEV/FCEV im Jahr 2030) Internalisierung ex-	Robuster Pfad zur Erreichung der Klimaschutzziele Größerer Zeitraum für die Einführung neuer Antriebs-technologien (Hersteller) und Änderung von Gewohnheiten (Nutzer) Co-Benefits bei Luft-	Geringere Planungssicherheit für Hersteller Risiko für verspätete Entwicklung von Zukunftstechnologien, Geschäftsmodellen und Handelspartnerschaften Skaleneffekte kön-

	terner Kosten / CO <sub>2</sub> -Bepreisung	reinhaltung und Lärmreduktion Mittlere Offenheit für verschiedene technische Lösungen	nen erst später realisiert werden
keine zielgerichtete Förderung spezifischer Antriebstechnologien und ggf. spätere Pfadentscheidung	keine zielgerichtete Förderung von Antriebstechnologien Emissionsminderung bei allen Verkehrsträgern vorrangig durch Energieeffizienz und Kraftstoffe	Weiternutzung der bestehenden Technologien und Infrastrukturen Zunächst keine Anpassung der Gewohnheiten (Nutzer) und der Produktionsprozesse notwendig Größte Offenheit für verschiedene technische Lösungen	Wenig robuster Pfad zur Erreichung der Klimaschutzziele Verharren in etablierten Technologien / Verpassen von Zukunftstechnologien Risiko eines von außen ausgelösten disruptiven Systemumbruchs geringe Planungssicherheit für Hersteller / hohe Kosten für Weiterentwicklung mehrerer Antriebstechnologien

---

### Unsicherheiten und externe Treiber

Entwicklung der globalen Fahrzeugmärkte und regulative Entscheidungen in diesen Märkten

Preisentwicklung natürlicher Ressourcen (z.B. Rohöl, Lithium, Kobalt, Platin)

Digitalisierung und autonomes Fahren

---

### Wechselwirkungen mit anderen Richtungsentscheidungen

Entwicklung des Stromsektors; Entwicklung alternativer Kraftstoffe

Strategien/Pläne und Gerichtsurteile zur Luftreinhaltung in Städten sowie Entwicklung kommunaler Klimaschutz- und Verkehrskonzepte

Globale, EU-weite und nationale Regulierungen, z.B. CO<sub>2</sub>-Zielwerte, Richtlinie zum Aufbau alternativer Energieversorgungs-Infrastrukturen, Energiesteuern

---

### Beschreibung der Ausgestaltungsmöglichkeiten

#### *Kurzfristiger und schneller Umstieg auf elektrische Antriebe*

Die Variante eines kurzfristigen und schnellen Umstiegs auf die Elektromobilität zeichnet sich dadurch aus, dass Fahrzeuge mit Elektromotor bereits frühzeitig hohe Anteile an den Neuzulassungen und auch am Fahrzeugbestand erreichen. Für die Fahrzeughersteller hat dies zur Folge, dass sehr große Teile der zur Verfügung stehenden F&E-Ressourcen in die Entwicklung des elektrischen Antriebs investiert werden (müssen). Ambitionierte Ziele zur Effizienzsteigerung von Verbrennungsmotoren stehen deshalb nicht mehr im Fokus. In dieser Ausgestaltungsvariante des Wandels wächst der Bestand an BEV, REEV und PHEV<sup>12</sup> bereits bis zum Jahr 2030 auf über 10 Mio. Fahrzeuge an.

Eine aktuelle Studie im Auftrag des Umweltbundesamtes (Bergk et al., 2017b) kommt zu dem Schluss, dass ein Bestand von 12 Mio. Elektrofahrzeugen (Pkw und leichte Nutzfahrzeuge) im Jahr 2030 notwendig ist, um die im deutschen Klimaschutzplan 2050 verankerten THG-Minderungsziele des Verkehrssektors ohne den großtechnischen Einsatz von strombasierten Kraftstoffen zu erreichen. Um

---

<sup>12</sup> HEV (Hybrid Electric Vehicles) werden hier nicht mit betrachtet, da sie nur über einen kleinen Elektromotor verfügen, der den verbrennungsmotorischen Hauptantrieb lediglich in besonderen Fahrsituationen (Beschleunigung, geringe Geschwindigkeiten bis 50 km/h) unterstützt bzw. ersetzt.

einen solchen Bestand zu erzielen, müssten Elektrofahrzeuge bereits 2025 ca. 30% und im Jahr 2030 rund 70% an den Pkw- und LNF-Neuzulassungen erreichen. Die Agora Verkehrswende (Agora Verkehrswende, 2018) weist in der Variante „ProKlima Plus“ für das Jahr 2030 einen Bestand von 10,6 Mio. Elektro-Pkw aus, der durch Neuzulassungsanteile von 45% in 2025 und 76% in 2030 erreicht wird. Der schnellste Umstieg auf elektrische Antriebe wird im Dekarbonisierungsszenario 2035 von Greenpeace (Rudolph et al., 2017) beschrieben, das einen Ausstieg aus dem Verbrennungsmotor bereits bis 2025 vorsieht. Bis zum Jahr 2035 haben E-Fahrzeuge einen Anteil von 98% am privaten Pkw-Bestand erreicht. Auch gibt es Staaten, in denen diese Strategie als Kurzfrist- bzw. Mittelfristziel verankert ist, beispielsweise in Norwegen (ab 2025) (Årskaug, 2016) und den Niederlanden (ab 2030) (Krempf, 2017).

In der hier beschriebenen Ausgestaltungsvariante findet, parallel zum Pkw-Bereich, auch bei den leichten (bis 3,5 t) und schweren Nutzfahrzeugen (Lkw und Busse) kurz- bis mittelfristig ein Umstieg auf elektrische Fahrzeuge statt. Am schnellsten setzt sich der elektrische Antrieb im Liefer- und Verteilerverkehr sowie bei Stadtbussen durch, wo die Fahrzeuge keine Langstrecken zu bewältigen haben und besonders hohe Anforderungen an die Schadstoff- und Lärmreduktion bestehen.

Für den schweren Güterverkehr werden die am stärksten befahrenen Autobahnen in Deutschland bereits bis zum Jahr 2024 mit Oberleitungen ausgestattet, so dass Oberleitungshybrid-Lkw (OH-Lkw) ab dem Jahr 2025 relevante Anteile an den Lkw-Neuzulassungen erreichen. Bis zum Jahr 2030 ist der Bestand der OH-Lkw bereits auf ein Viertel des Gesamtbestandes an Lkw mit über 12 t zulässigem Gesamtgewicht angestiegen. Dies entspricht gemäß der Machbarkeitsstudie zur Ermittlung der Potentiale des Hybrid-Oberleitungs-Lkw (Wietschel et al., 2017) ca. 50.000 bis 70.000 OH-Lkw-Fahrzeugen. Das Dekarbonisierungsszenario 2035 von Greenpeace geht sogar davon aus, dass 80% des Güterfernverkehrs auf der Straße durch Oberleitungs-Lkw elektrifiziert werden.

Rein batterieelektrische Lkw für den Fernverkehr kommen, begünstigt durch die hohe Kosten- und Gewichtsreduktion bei Batterien, etwa zeitgleich zu den OH-Lkw auf die Straße und werden vorwiegend in Gebieten abseits des E-Highway-Netzes sowie zum Transport leichterer Gütergruppen eingesetzt. Parallel zur Elektrifizierung wichtiger Autobahnen wird auch die Elektrifizierung des Schienennetzes beschleunigt, so dass die ohnehin geringe Bedeutung des Dieselmotors bei Bahnfahrzeugen weiter abnimmt.

#### *Gradueller Markthochlauf elektrischer Antriebe sowie Effizienzsteigerung bei ICEV*

Bei dieser Ausgestaltungsmöglichkeit werden der Umstieg auf elektrische Antriebe und die Steigerung der Effizienz des klassischen Verbrennungsmotors weiterhin ambitioniert verfolgt. Beide Antriebsarten werden mit großem F&E-Aufwand weiterentwickelt und spielen mittelfristig sowohl für das Geschäft der Fahrzeughersteller als auch bei der Verringerung des Energieverbrauchs und der Erreichung der Klimaschutzziele im Verkehrssektor eine wichtige Rolle. Langfristig verlieren Fahrzeuge mit Verbrennungsmotor jedoch stark an Bedeutung. Auch ein langfristig angestrebtes Verbot von ICEV-Neuzulassungen, wie es beispielsweise in Frankreich (Huppertz, 2017) und Großbritannien (Harrabin, 2017) diskutiert wird (ab dem Jahr 2040), lässt sich dieser Ausgestaltungsmöglichkeit zuordnen.

Die Variante eines graduellen Markthochlaufs der Elektromobilität ist dadurch gekennzeichnet, dass sich die Nutzer eher mittelfristig an die veränderten Eigenschaften der elektrischen Fahrzeuge gewöhnen müssen. Für die Fahrzeughersteller steht mehr Zeit zur Verfügung, um Elektrofahrzeuge (weiter) zu entwickeln und Modellpalette sowie Produktionskapazitäten auf den elektrischen Antrieb umzustellen. Auch für den flächendeckenden Aufbau der Ladeinfrastruktur bleibt mehr Zeit als in der Ausgestaltungsvariante einer kurzfristigen Umstellung auf Elektroantriebe. Dafür wird eine deutliche Reduktion der Schadstoff- und Lärmemissionen langsamer und später erreicht.

Durch ambitionierte CO<sub>2</sub>-Zielwerte bei Pkw, leichten Nutzfahrzeugen und Lkw sowie Anreize durch Steuern und Abgaben (Energiesteuern, Mautsätze) wird ein gradueller Markthochlauf elektrischer Antriebe erfolgreich in Gang gesetzt und das Ziel der Bundesregierung von 6 Mio. Elektro-Pkw im Bestand im Jahr 2030 erreicht. Dieser Bestand entspricht dem Szenario Effizienz in der Studie „Renewability“ des Öko-Instituts (Zimmer et al., 2016a) und dem Szenario Klimaschutz E+ der UBA-Studie „Klimaschutzbeitrag des Verkehrs bis 2050“ (Bergk et al., 2017a). Auch in der aktuellen Studie „Klimapfade für Deutschland“ des BDI (The Boston Consulting Group & Prognos, 2018) wird sowohl für den 80%- als auch für den 95%-Klimapfad ein Bestand von 6 Mio. E-Pkw im Jahr 2030 ausgewiesen (4 Mio. BEV und 2 Mio. PHEV). In beiden Klimapfaden erreichen elektrische Pkw im Jahr 2020 bereits einen Anteil von 9% an den Neuzulassungen, der auf 40% im Jahr 2030 ansteigt. Auch weitere Szenarien wie das Szenario „ProKlima“ von Agora Verkehrswende und Öko-Institut (Agora Verkehrswende,

2018) und die Szenarien in „Klimaschutzszenario 2050“ des BMUB (Repenning et al., 2015b) weisen E-Fahrzeug-Anteil in dieser Größenordnung auf.

Brennstoffzellenfahrzeuge spielen in keinem der vorgenannten Szenarien eine nennenswerte Rolle, und auch nach 2030 bleibt ihr Anteil am gesamten Pkw-Bestand gering. Bei stärkeren Kostendegressionen als bisher angenommen, hätte Brennstoffzellen-Pkw über die Rahmensetzung jedoch die Möglichkeit, verstärkt in den Pkw-Bestand zu kommen.

Im Bereich der leichten Nutzfahrzeuge wird in den meisten Szenarien eine ähnliche Entwicklung wie bei den Pkw angenommen, d.h. der Anteil elektrischer Antriebe an den LNF-Neuzulassungen und -Bestand erhöht sich in etwa analog zum E-Anteil bei den Pkw. Bei den schweren Nutzfahrzeugen spielt in allen o.g. Szenarien eines graduellen Markthochlaufs elektrischer Antriebe die Technologie des Oberleitungs-Lkw eine Rolle. Während die Markteinführung in den 2020er Jahren erfolgt (Aufbau der Infrastruktur, Inverkehrbringen der ersten Oberleitungs-Fahrzeuge), wird der Markthochlauf in den o.g. Szenarien in den 2030er Jahren erwartet. Es wird davon ausgegangen, dass langfristig ein Drittel bis zwei Drittel des deutschen Autobahnnetzes (4.000 bis 8.000 Kilometer) mit Oberleitungen elektrifiziert wird und somit ein Großteil des Straßengüterfernverkehrs mit Oberleitungs-Lkw erbracht wird.

Rein batterieelektrische Lkw spielen im Verteilerverkehr eine große Rolle, der durch wesentlich geringere Transportentfernungen gekennzeichnet ist, nicht aber im Fernverkehr. Brennstoffzellen-Lkw spielen in den meisten Szenarien auch langfristig keine oder keine große Rolle. Dieser Antriebstechnologie – die ebenfalls zu den elektrischen Antrieben gerechnet werden kann, da die Brennstoffzelle einen Elektromotor speist – wird in den o.g. Szenarien ein maximaler Marktanteil von 10% im Jahr 2050 zugemessen (95%-Klimapfad des BDI).

*Gleichberechtigte Weiterentwicklung aller Antriebstechnologien und ggf. spätere Pfadentscheidung*

Die dritte Ausgestaltungsmöglichkeit sieht keine zielgerichtete Förderung von Antriebstechnologien vor und entspricht damit dem Prinzip der Technologieoffenheit. Bei diesem Weg steht auch mittel- und langfristig die Weiterentwicklung des konventionellen Antriebsstrangs stark im Fokus der Hersteller, insbesondere in Bezug auf Energieeffizienz und Schadstoffreduktion. Neben der weiteren Optimierung von Benzin- und Dieselmotoren rücken zunehmend auch die technologiebedingt besonders schadstoffarmen Gasmotoren (LPG, CNG, LNG) sowie die Brennstoffzelle ins Zentrum der F&E-Bemühungen. Ein weiterer wichtiger Entwicklungsstrang ist die Teilelektrifizierung des Antriebsstrangs durch Hybridisierung (HEV und PHEV); auch vollelektrische Fahrzeuge (BEV) erreichen sukzessive höhere Marktanteile. Langfristig können die verbleibenden Emissionen der Fahrzeuge v.a. durch Dekarbonisierung der Kraftstoffe bis auf Null gesenkt werden (siehe Abschnitt 3.3.2).

Dieser Ausgestaltungsmöglichkeit entspricht die Energierferenzprognose des BMWi (Schlesinger et al., 2014b), bei der konventionelle Benzin- und Dieselfahrzeuge noch über 80 % des Fahrzeugbestandes im Jahr 2030 ausmachen. Weitere über 10% entfallen auf hybridisierte Benziner sowie Gasfahrzeuge, während der elektrische Antrieb (BEV, PHEV und FCEV) mit knapp 3 Mio. Fahrzeugen lediglich einen Anteil von 6% am Pkw-Bestand des Jahres 2030 erreicht. Bis 2050 wächst die Zahl der Elektro-Pkw in dieser Prognose auf knapp 10 Mio. Fahrzeuge (davon ca. 1 Mio. Brennstoffzellenfahrzeuge) und erreicht damit einen Anteil von 23% am Gesamtbestand.

## **Gegenüberstellung der Ausgestaltungsmöglichkeiten**

Alle drei dargestellten Entwicklungspfade ermöglichen prinzipiell eine vollständige Dekarbonisierung des Verkehrssektors und damit das Erreichen der Klimaschutzziele. Dennoch bestehen zwischen den Varianten Unterschiede in Bezug auf die Risiken, die zur Nicht-Erreichung der Klimaschutzziele führen können:

Der Entwicklungspfad eines graduellen Umstiegs auf Elektrofahrzeuge kann als eher **robust** in Bezug auf die Erreichung der deutschen Klimaschutzziele angesehen werden. Vorteile ergeben sich durch die hohe Energieeffizienz der elektrischen und konventionellen Antriebe, so dass unabhängig vom Markterfolg der elektrischen Fahrzeuge und den Entwicklungen im Bereich der Energieversorgung des Verkehrs eine Klimaschutzwirkung erreicht wird. Zudem entsteht bei einer langfristig starken Elektrifizierung (Entwicklungspfade schneller und gradueller Umstieg auf elektrische Antriebe) die Möglichkeit, die erneuerbare Energieversorgung des Verkehrs stärker als bisher bzw. im europäischen Verbund umzusetzen (~150 TWh an zusätzlichem Strombedarf). Der Entwicklungspfad einer gleichberechtigten Weiterentwicklung aller Antriebstechnologien verlässt sich im Vergleich dazu auf die mengenmäßig große Verfügbarkeit nachhaltiger alternativer Kraftstoffe (siehe Abschnitt 3.3.2).

Die Variante eines schnellen Umstiegs auf elektrische Antriebe ist kurzfristig mit den höchsten Zusatzkosten verbunden, da in kurzer Zeit hohe Anfangsinvestitionen in die Elektrofahrzeuge und die Ladeinfrastruktur getätigt werden müssen. Mittel- bis langfristig ergibt sich auf Grund der hohen Energieeffizienz und der fallenden Fahrzeugkosten bei einem hohen Anteil an batterieelektrischen Fahrzeugen jedoch ein vorteilhaftes System bezüglich der **Gesamtkosten** (Kasten et al., 2016). In einem stark verbrennungsmotorisch geprägten Szenario überwiegen systemseitig die hohen Energiekosten. Bei Brennstoffzellenfahrzeugen müsste zudem eine Transport- und Verteilinfrastruktur für H<sub>2</sub> aufgebaut werden.

Die **Automobilindustrie** steht durch die weitere Automatisierung (Industrie 4.0) und die voranschreitende Digitalisierung (z.B. autonomes Fahren) vor einem Wandel (Helbig et al., 2017), der einen erheblichen Einfluss auf die Beschäftigung und Wertschöpfung haben wird. Ein Umstieg auf alternative Antriebstechnologien würde Wertschöpfungsstrukturen und Produktionsprozesse zusätzlich verändern und die Fahrzeugbatterie und ggf. die Brennstoffzelle zu relevanten Komponenten hinsichtlich der Wertschöpfung machen (Arndt et al., 2013; Spath et al., 2012). Ein schneller Umstieg auf batterieelektrische Fahrzeuge wäre mit einer schnellen Umstellung auf neue Produktionsprozesse und wahrscheinlich auch mit kurzfristigen Wertschöpfungsverlusten für die deutsche Automobilindustrie verbunden. Andererseits würde dies aber einen frühen Einstieg in eine Zukunftstechnologie ermöglichen und ggf. mittel- bis langfristig zu Marktvorteilen und der Ansiedlung relevanter Produktionsschritte für die Wertschöpfung in Deutschland führen. Bei einem verspäteten Einstieg in die Zukunftstechnologien wie möglicherweise bei einer technologieunspezifischen Lösung steigt die Gefahr von disruptiven, ungesteuerten Umbrüchen durch Entwicklungen und Rahmensetzungen außerhalb Deutschlands und der EU.

Für die Fahrzeugnutzer wäre die zukünftige Nutzung von verbrennungsmotorischen Fahrzeugen mit den wenigsten Anpassungen zum heutigen System verbunden. Geringere Reichweiten und längere Ladezeiten bei der Nutzung batterieelektrischer Fahrzeuge können zu Anpassungen von **Gewohnheiten** und auch zu einem veränderten Nutzungsverhalten führen. Am Beispiel Norwegen lässt sich jedoch erkennen, dass selbst bei einer breiten Markteinführung eine hohe Akzeptanz für batterieelektrische Fahrzeuge erreicht werden kann und sich nur geringere Veränderungen in der Fahrzeugnutzung und auch nur selten Nutzungsrestriktionen einstellen (Figenbaum & Kolbenstedt, 2016).

**Externe Treiber** wie die politische Rahmensetzung in anderen Staaten können einen erheblichen Einfluss haben. Eine zunehmende Anzahl von Staaten hat sich das Ziel gesetzt, kurz- bis mittelfristig keine verbrennungsmotorischen Fahrzeuge mehr zuzulassen (z. B. Norwegen ab 2025, Niederlande 2030, Großbritannien ab 2040; Frankreich ab 2040). Die Preisentwicklung verschiedener Ressourcen wie beispielsweise Rohöl, Lithium, Kobalt, Platin wird ebenfalls die Kostenentwicklung verschiedener Antriebsoptionen entscheidend beeinflussen. Auch wird die sonstige Entwicklung der Digitalisierung hinsichtlich neuer Geschäftsmodelle im Fahrzeugbereich sowie bezüglich der potenziellen Einführung des autonomen Fahrens einen Einfluss auf die Entwicklungspotenziale der unterschiedlichen Technologien besitzen.

## Stakeholder-Positionen

### Umweltverbände

*Greenpeace* fordert in seiner Studie „*Verkehrswende für Deutschland*“ (Rudolph et al., 2017) eine grundlegende Neuausrichtung der Mobilität in Deutschland, damit der Verkehrssektor bis 2035 CO<sub>2</sub>-frei und das im Pariser Klimaschutzabkommen vereinbarte 1,5-Grad-Ziel erreicht werden kann. Deshalb soll in Deutschland die Verkehrswende so schnell wie möglich eingeleitet werden. Eine zentrale Forderung ist dabei der schnelle Ausstieg aus dem Verbrennungsmotor – bereits ab 2025 soll es keine Neuzulassungen für Pkw mit Verbrennungsmotor mehr geben. Auf diese Weise kann sichergestellt werden, dass bereits im Jahr 2035 nahezu der gesamte Pkw-Bestand aus Elektrofahrzeugen besteht. Die Position begründet *Greenpeace* auch mit dem industriepolitischen Argument der höheren Planungssicherheit für die Industrie.

Im Verbändekonzept „*Klimafreundlicher Verkehr in Deutschland*“ von *WWF*, *BUND*, *Germanwatch*, *NABU* und *VCD* wird betont, dass sich Deutschland als Industrienation am oberen Rand seines selbst gesetzten Ziels orientieren muss, die Treibhausgasemissionen bis 2050 um 80 bis 95% gegenüber 1990 zu reduzieren (Erhard et al., 2014). Folglich bildet ein Szenario zur fast vollständigen Treibhausgasemissionsminderung im Verkehr den Kern des Verbändekonzeptes. Effizienzsteigerungen bei allen Verkehrsträgern und der Einführung elektrischer Antriebe im Straßenverkehr wird dabei eine höhere

Priorität zugemessen als der Dekarbonisierung von Kraftstoffen. Ab 2040 sollen fast ausschließlich Elektroautos mit Elektroantrieb neu zugelassen werden. Im Jahr 2050 ist der Verbrennungsmotor weitgehend aus dem Straßenverkehr verschwunden; er kommt nur noch bei Plug-In-Hybridfahrzeugen sowie teilweise bei Lkw im Fernverkehr (neben Oberleitungs-Lkw) zum Einsatz.

### **Industrieverbände**

Der *Bundesverband der Deutschen Industrie* (BDI) fordert die Bundesregierung in seinen Handlungsempfehlungen zur Studie „Klimapfade für Deutschland“ (The Boston Consulting Group & Prognos, 2018) auf, technologieoffen Forschung und Entwicklung an allen innovativen Antrieben und Kraftstoffen zu fördern. Verschiedene technische Lösungen sollen miteinander konkurrieren und neben der CO<sub>2</sub>-Vermeidung auch dem Erhalt der wirtschaftlichen Wettbewerbsfähigkeit und der Verbraucherakzeptanz gerecht werden. Dabei lehnt er es ab, spezifische Technologien durchzusetzen. Bei der Implementierung von Fördermaßnahmen ist zu beachten, dass sie eine technologie neutrale, diversifizierte Marktdurchdringung von CO<sub>2</sub>-freien Mobilitätsformen ohne ordnungsrechtliche Eingriffe ermöglichen.

Gemäß den Ergebnissen der Studie „Klimapfade für Deutschland“ geht der BDI davon aus, dass batterieelektrische Personenfahrzeuge einen großen Teil der neuen Mobilitätslösungen ausmachen und ihr Markthochlauf gefördert werden muss. Um die volkswirtschaftlichen Zusatzkosten aber möglichst gering zu halten, ist laut Studie ein signifikanter Einstieg in die batterieelektrische Mobilität erst nach weit fortgeschrittener Lernkurve in den 2030er Jahren sinnvoll. Dabei sollte die Politik den Aufbau neuer Kompetenzen wie beispielweise die Batteriezellproduktion angemessen begleiten und sich am Aufbau einer öffentlichen Ladeinfrastruktur beteiligen. Im schweren Straßengüterverkehr ist der Technologie-wettbewerb zur THG-Reduktion zwischen Brennstoffzellen, Oberleitungen, Batterien sowie mit synthetischen Kraftstoffen angetriebene Verbrennungsmotoren aus Sicht des BDI noch offen.

Der *Verband der Automobilindustrie* (VDA) fordert politische Rahmenbedingungen, die technologieoffen und langfristig verlässlich sind. Nationale THG-Reduktionsziele für einzelne Branchen werden abgelehnt, auch die Sektorziele des Klimaschutzplan bis 2030 bezeichnet der VDA als ungeeignetes Steuerungsinstrument. Kurzfristige Eingriffe in das „ausgeklügelte deutsche Steuersystem“ werden abgelehnt; diese Position bezieht sich ausdrücklich auch auf eine CO<sub>2</sub>-Steuer. Stattdessen setzt der VDA auf eine CO<sub>2</sub>-Regulierung in Europa, die den Markterfolg der alternativen Antriebe berücksichtigt. Außerdem fordert der VDA, dass die EU-Kommission auf eine Quote für Elektroautos verzichtet. Der VDA sieht einen relevanten Anteil von 15-25% elektrischer Pkw an den Neuzulassungen in Europa bis 2025 als ambitioniert, aber relevant an. Ein Verbot einzelner Technologien wird strikt abgelehnt, da „gerade der Verbrennungsmotor [...] zur Dekarbonisierung“ beiträgt, insbesondere in Verbindung mit synthetischen Kraftstoffen (Verband der Automobilindustrie, 2018).

### **Weitere zivilgesellschaftliche Akteure**

Der Think Tank *Agora Verkehrswende* sieht die Energieeffizienzsteigerung im Straßenverkehr als einen zentralen Baustein einer nachhaltigen, zukünftigen Mobilität (Agora Verkehrswende, 2017). Der elektrische Antrieb und ein zügiger Markthochlauf batterieelektrischer Fahrzeuge sind daher ein Bestandteil der Forderungen des Think Tanks.

Die *IG Metall* sieht in ihrer Positionierung zur zukünftigen CO<sub>2</sub>-Regulierung bei allen Antriebstechnologien Innovationspotenziale, die zur Emissionsminderung beitragen können (Wetzel, 2014). Gleichzeitig verweist sie aber darauf, dass die Potenziale der Effizienzsteigerung bei verbrennungsmotorischen Fahrzeugen begrenzt sind und die Elektromobilität einen wesentlichen Beitrag zur Erreichung der Klimaschutzziele beitragen wird. Aus Beschäftigtensicht fordert sie daher einen Entwicklungspfad der einerseits die Potenziale der vorherrschenden verbrennungsmotorischen Technologien weiter vorantreibt, aber auch die Elektromobilität in Deutschland und der EU verankert, um langfristig die Wertschöpfung der Elektromobilität in Europa zu gewährleisten. Die Ausgestaltung der zukünftigen CO<sub>2</sub>-Emissionsstandards für Pkw spielt dabei nach Meinung der IG Metall eine zentrale Rolle.

### 3.3.2. Umstieg auf eine erneuerbare Energieversorgung des Verkehrs

Tabelle 18: Übersicht der Ausgestaltungsmöglichkeiten eines Umstiegs auf eine erneuerbare Energieversorgung des Verkehrs (Quelle: Eigene Darstellung)

Möglichkeit	Beschreibung	Pro	Contra
Fokus auf EE-Strom im Verkehr (Zusätzliche Stromerzeugung für den Verkehrssektor vollständig erneuerbar)	<ul style="list-style-type: none"> <li>Zusätzliche Stromnachfrage des Verkehrssektors vollständig erneuerbar</li> <li>Langsame Einführung alternativer Kraftstoffe ab 2025 in Luft- und Seeschifffahrt</li> <li>Auslaufenlassen anbaubasierter Biokraftstoffe</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Höchste systemische Energieeffizienz</li> <li>Schnelle Verringerung der Abhängigkeit von Kraftstoffimporten</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Kurzfristig hohe Investitionen in Lade- und Überleitungsinfrastruktur und ggf. in Verteilnetze notwendig</li> <li>Netzdienliches Laden wird frühzeitig notwendig (à Verhaltensänderung, neue Geschäftsmodelle)</li> <li>Fehlender Know-How-Aufbau / fehlende Kostendegression für alternative Kraftstoffe</li> <li>Kein robuster Klimaschutzpfad</li> </ul>
Stromerzeugung für den Verkehrssektor entsprechend heutigem Zielpfad; mittelfristig gradueller Einstieg in alternative Kraftstoffe	<ul style="list-style-type: none"> <li>EE-Anteil in Stromerzeugung ~60% im Jahr 2030</li> <li>Einfrieren der Menge anbaubasierter Biokraftstoffe auf heutigem Niveau</li> <li>EE-Anteil des Verkehrssektors (inkl. Luft- und Seeschifffahrt) ~7 % im Jahr 2030 (ohne Anrechnung anbaubasierte Biokraftstoffe)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Robuster Klimaschutzpfad, da schnell hoher Klimaschutzbeitrag und flexible Strategien möglich sind.</li> <li>Hohe Flexibilität, da Nutzung verschiedenster Energieträger</li> <li>Gradueller Einstiegspfad in für die Energiewende benötigte Technologie (Elektrolyse)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Verfügbares Mengenpotenzial an nachhaltigen alternativen Kraftstoffen unsicher</li> <li>Kurzfristig hohe Kosten für nachhaltige, alternative Kraftstoffe</li> <li>Richtungsunsicherheit für Energieinfrastruktur im Verkehr, ggf. Infrastrukturinvestitionen für verschiedene Energieträger</li> <li>Risiko für negative ökologische und soziale Auswirkungen wegen fehlender Nach-</li> </ul>

Möglichkeit	Beschreibung	Pro	Contra
			haltigkeitsstan- dards bei syntheti- schen Kraftstoffen
Fokus auf alternative Kraftstoffe / Schneller Einstieg in alternative Kraftstoffe	<ul style="list-style-type: none"> <li>· THG-Minderung wird überwiegend durch alternative Kraftstoffe erreicht</li> <li>· Einfrieren der Menge anbaubasierter Biokraftstoffe auf heutigem Niveau</li> <li>· EE-Anteil des Verkehrssektors (ohne Luft- und Seeschifffahrt) ~30 % im Jahr 2030<sup>13</sup> (ohne Anrechnung anbaubasierte Biokraftstoffe)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>· Schnell hoher Klimaschutzbeitrag möglich</li> <li>· Geringer nutzerseitiger Anpassungsbedarf; geringer Anpassungsbedarf der Infrastruktur</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>· Verfügbares Mengenpotenzial an nachhaltigen alternativen Kraftstoffen unsicher, keine robuste Klimaschutzstrategie</li> <li>· Kurzfristig sehr hohe Kosten für nachhaltige, alternative Kraftstoffe</li> <li>· Einstieg in Wasserstoffwirtschaft aufgrund von fehlender Infrastruktur unwahrscheinlich</li> <li>· Risiko für negative ökologische und soziale Auswirkungen wegen fehlender Nachhaltigkeitsstandards bei synthetischen Kraftstoffen</li> </ul>

#### Unsicherheiten und Externe Treiber

- Anstrengungen zur Reduktion der städtischen Luftschadstoff- und Lärmbelastung (mögliche innerstädtische Fahrverbote für verbrennungsmotorische Fahrzeuge)
- Europäische Regulierungen (Ausgestaltung CO<sub>2</sub>-Emissionsstandards oder -handel, RED II)
- Festlegungen von Nachbarländern, EU-Staaten und Internationalen Handelspartner auf Technologieoptionen

#### Wechselwirkungen mit anderen Richtungsentscheidungen und Unsicherheiten

- Verfügbarkeit von EE-Strom und nachhaltiger Biomasse
- Mengenbedarfe an Kraftstoffen abhängig von Entwicklung der Effizienz und Verkehrsnachfrage
- Nutzungskonkurrenz mit anderen Sektoren
- Bedarf richtet sich nach Entwicklung der Antriebstechnologien in Fahrzeugen
- Neue Importabhängigkeiten und Kooperationsbedarf mit neuen Partnerländern

<sup>13</sup> (Zimmer et al., In Bearbeitung)

### Fragestellung/Problemaufriss

Die Energieversorgung des Verkehrssektors basiert heute im Wesentlichen auf fossilen Kraftstoffen. Dabei werden unterschiedliche Kraftstoffe und Energieträger wie Diesel, Benzin, CNG und LPG (Straßenverkehr), Kerosin (Flugverkehr), MFO<sup>14</sup>, MDO und Diesel (Schifffahrt) sowie Diesel und Strom<sup>15</sup> (Schienenverkehr) eingesetzt. Der Endenergieverbrauch des Verkehrssektors in Deutschland lag im Jahr 2014 bei 2,3 EJ. Den größten Anteil daran haben die fossile Kraftstoffe Diesel (58 %) und Benzin (32 %). Auf die Biokraftstoffe entfiel im Jahr 2014 ein Anteil rund 5 % (BReg, 2017).

Die Reduzierung der CO<sub>2</sub>-Intensität der Energieversorgung ist ein notwendiger Schritt für die Dekarbonisierung des Verkehrssektors. Dies kann bis hin zum vollständigen Einsatz von Kraftstoffen und Strom aus erneuerbaren Quellen führen. Neben flüssigen und gasförmigen Biokraftstoffen fällt darunter erneuerbar erzeugter Wasserstoff (Elektrolyse von Wasser mit erneuerbar erzeugtem Strom) sowie synthetische Kraftstoffe (Power-to-liquid; PtL) und Methan (Power-to-gas; PtG-Methan), welche aus erneuerbar erzeugtem Wasserstoff und CO<sub>2</sub> hergestellt werden (Kasten et al., 2013). Bei den biogenen Kraftstoffen wird zudem zwischen Biokraftstoffen aus Anbaubiomasse, deren ökologische und soziale Nachhaltigkeit gering ist, und fortschrittlichen Biokraftstoffen der zweiten und dritten Generation aus Rest- und Abfallstoffen unterschieden.

Der aktuelle europarechtliche Rahmen in Bezug auf den Einsatz erneuerbarer Energieträger im Verkehrssektor wird durch die europäische Kraftstoffqualitätsrichtlinie und Erneuerbare-Energien-Richtlinie gesetzt. Die Kraftstoffqualitätsrichtlinie sieht vor, dass sich die Treibhausgasemissionen pro Energieeinheit im gesamten Lebenszyklus bis 2020 um 6 % ggü. einem fossilen Referenzkraftstoff verringern. In der Erneuerbare-Energien-Richtlinie ist vorgesehen, dass 10% des Energieverbrauchs im Verkehrssektor jedes EU-Mitgliedstaates durch Erneuerbare Energien zu erbringen sind. Im Jahr 2015 wurde eine Begrenzung für Kraftstoffe aus Anbaubiomasse von 7% eingeführt.

Der aktuelle Vorschlag der EU Kommission für die Weiterentwicklung der Erneuerbare-Energien-Richtlinie über das Jahr 2020 hinaus sieht vor, dass bis zum Jahr 2030 6,8 % der Kraftstoffe im Verkehrssektor aus erneuerbaren Quellen stammen müssen. Dies sind insbesondere Biokraftstoffe der 2. und 3. Generation, flüssige und gasförmige Kraftstoffe aus nicht biologischen erneuerbaren Quellen (PtX), Kraftstoffe aus Abfallbiomasse und erneuerbarer Strom. Kraftstoffe aus Anbaubiomasse werden im Kommissionsvorschlag nicht zur Zielerreichung gezählt und bleiben auf den heutigen relativen Mengenanteil begrenzt (ICCT, 2017).

Grundsätzlich würde mit dem Kommissionsvorschlag eine verstärkte Nutzung von flüssigen und gasförmigen Kraftstoffen aus erneuerbaren Quellen vorangebracht. Flüssige Kohlenwasserstoffe wie Bio- und synthetische (stromgenerierte) Kraftstoffe könnten ohne größeren Anpassungsbedarf auf Seiten der Fahrzeuge und der Infrastruktur eingesetzt werden. Aufgrund der hohen Energiedichte der Flüssigkraftstoffe ist der Einsatz besonders auf Langstrecken sinnvoll (z.B. Straßengüterfernverkehr, Internationale Schifffahrt) bzw. auf absehbare Zeit nahezu alternativlos (Luffahrt).

Für den Einsatz von regenerativ erzeugtem Methan könnte teilweise auf die vorhandene Transport- und Verteilinfrastruktur für Erdgas zurückgegriffen werden. Die Anzahl der vorhandenen öffentlichen Erdgastankstellen und Betriebstankstellen liegt jedoch weit unter den konventionellen Tankstellen, weshalb für die Akzeptanz der Nutzer ein zusätzlicher Infrastrukturausbau notwendig würde. Für den Einsatz in Lkw im Fernverkehr wäre flüssiges Methan eine mögliche Option, gleiches gilt für die Schifffahrt (Kasten et al., 2016). Es existieren für die verschiedenen Anwendungen im Verkehrssektor also teilweise unterschiedliche Energieversorgungsoptionen, wobei sie allerdings auch untereinander und mit anderen Sektoren um dieselben Energieträger und Ressourcen konkurrieren.

Durch die Verwendung von Strom, Methan und Wasserstoff im Verkehrssektor ergeben sich Anpassungsbedarfe auf Seiten der Fahrzeuge, welche in Abschnitt 3.3.1 diskutiert werden.

---

<sup>14</sup> In der Seeschifffahrt wird MFO (Medium Fuel Oil) und in emissionsregulierten Zonen Marine Diesel (MDO) eingesetzt.

<sup>15</sup> Im elektrischen Schienenverkehr ist hier der Anteil im Strommix aus fossilen Erzeugungsanlagen wie Braunkohle-Steinkohle und Gaskraftwerken zu verstehen.

Tabelle 19: Übersicht über erneuerbare Energieversorgungsoptionen differenziert nach Verkehrsmittel (Quelle: Eigene Darstellung auf Basis von (Schmied et al., 2014)) und (Kasten et al., 2016))

	Pkw	Lkw-Nahverkehr	Lkw-Fernverkehr	Linienbus	Luftfahrt	Schifffahrt	Schieneverkehr
PtL / Biokraftstoffe	●	●	●	●	●	●	●
PtG-Methan / Biogas (komprimiert)	●	●		●			
PtG-Methan / Biogas (verflüssigt)			●			●	
PtG-H2 (komprimiert)	●	●		●			
PtG-H2 (verflüssigt)			●			●	
Strom direkt	●	●	● <sup>1)</sup>	●			●

● = mögliche Energieversorgungsoption  
<sup>1)</sup> Oberleitungs-Lkw

Die Produktion von Kraftstoffen aus erneuerbaren Energien im industriellen Maßstab kann mit einem erheblichen Primärenergiebedarf, Flächenverbrauch sowie weiteren Umweltauswirkungen wie z. B. Wasserverbrauch verbunden sein. Aus diesem Grund sind umfassende Nachhaltigkeitskriterien für alternative Kraftstoffe vor der Markteinführung der Kraftstoffe notwendig, um positive Umweltwirkungen zu gewährleisten. Für synthetische Kraftstoffe sind bisher keine Nachhaltigkeitskriterien entwickelt (Bracker & Timpe, 2017).

Der größte Schwachpunkt der synthetischen Kraftstoffe liegt im hohen Primärenergieverbrauch durch Energieverluste bei Elektrolyse, Kraftstoffsynthese, Verflüssigung und Verbrennung. Der Gesamtwirkungsgrad batterieelektrischer Pkw von Stromentnahme aus dem Netz bis zur Umsetzung in Fahrleistung liegt beispielsweise bei rund 70 %, der eines H<sub>2</sub>-Brennstoffzellen-Pkw bei rund 25 % und der eines verbrennungsmotorischen Pkw mit PtL bei unter 15 % (Perner, 2018). Aus Effizienzgründen ist die direkte Nutzung von Strom vorzuziehen (Schmied et al., 2014).

Die niedrige Energieeffizienz schlägt sich auch in hohen Kosten nieder. Die Produktionskosten von PtG-Methan und PtL könnten anfänglich etwa 20 bis 30 Cent pro Kilowattstunde liegen (ohne Netzentgelte und Vertriebskosten). Bis zum Jahr 2050 könnten diese Kosten an optimalen Standorten außerhalb Deutschlands durch sinkende Stromgestehungskosten erneuerbaren Stroms auf etwa 10 Cent pro Kilowattstunde sinken. Heute werden die in Deutschland genutzten fossilen Kraftstoffe importiert. Sollen die synthetischen Kraftstoffe in Zukunft dagegen in Deutschland erzeugt werden, ist mit höheren Gestehungskosten als im europäischen und außereuropäischen Ausland zu rechnen. Die Kosten für PtG-Methan und PtL-Kraftstoff könnten im Jahr 2050 bei bis zu 19 ct/kWh liegen (Perner, 2018). Eine Produktion mit „Überschussstrom“<sup>16</sup> lässt keinen wirtschaftlichen Betrieb im relevanten Maßstab zu (Perner, 2018; Trapp et al., 2017).

Sowohl für synthetische Kraftstoffe als auch für Biokraftstoffe stellt sich die Frage nach den zukünftigen Mengenpotenzialen. (Schmied et al., 2014) nennen für Biokraftstoffe aus Reststoffen für das Jahr 2050 ein Potenzial von 13 bis 19 EJ, was nur rund 10% des globalen Endenergiebedarfes des Verkehrs in verschiedenen globalen Langfristszenarien entspricht. Aus techno-ökonomischer Sicht ergeben sich für synthetische Kraftstoffe größere Mengenpotenziale. Wie groß das nachhaltige Mengenpotenzial allerdings ist, ist bisher nicht ausreichend untersucht, um eine Einschätzung dazu abgeben zu können (Kasten, 2017).

Eine weitere Einschränkung der Mengenpotenziale für den Verkehrssektor stellt der Bedarf für die stoffliche und energetische Nutzung von flüssigen und gasförmigen Kohlenwasserstoffen sowie Wasserstoff in weiteren Sektoren (z.B. Haushalte, Industrie) dar. (Perner, 2018) zu Folge wurden im Jahr 2015 in Deutschland lediglich 38 % des Erdgases und Rohöls im Verkehrssektor verwendet. Es ist also von einer starken Konkurrenz um die verfügbaren synthetischen Kraftstoffe und Biokraftstoffe auszugehen.

## Beschreibung der Ausgestaltungsmöglichkeiten

Die aufgeführten möglichen Ausgestaltungsoptionen für die Nutzung erneuerbarer Energien im Verkehr unterscheiden sich hinsichtlich der zu erreichenden Zielstruktur. Dies wirkt sich einerseits auf die Art

<sup>16</sup> Überschussstrom sind Strommengen, die bei der volatilen Stromerzeugung von EE-Anlagen erzeugt werden und für die im Stromsystem kein Verbraucher gefunden wird.

der nachgefragten Energieträger (Energieträgermix) als auch auf die Antriebskonzepte (vgl. Abschnitt 3.3.1) aus.

Wesentliche Unterschiede zwischen den Ausgestaltungsvarianten liegen in dem sich über die Zeit steigenden Mengenbedarf von erneuerbarem Strom, synthetischen Kraftstoffen auf EE-Basis und fortschrittlichen Biokraftstoffen. In allen Ausgestaltungsvarianten wird aufgrund der zu erwartenden Anpassung der Erneuerbare-Energien-Richtlinie für das Jahr 2030 von einer stärkeren Verbreitung dieser alternativen Kraftstoffe ausgegangen.

*Fokus auf EE-Strom im Verkehr / Stromversorgung des Verkehrs ist vollständig erneuerbar*

Dieser Entwicklungspfad sieht kurzfristig die verstärkte direkte Nutzung von Strom im Straßenverkehr (z. B. batterieelektrische Fahrzeuge, Oberleitungs-Lkw) vor. Im Schienenverkehr steigt der elektrische Traktionsanteil durch den Ausbau des elektrifizierten Streckennetzes. In einem extremen Einstiegsszenario kann die Stromnachfrage im Jahr 2030 durch die Elektrifizierung des Straßenverkehrs auf rund 35 TWh ansteigen (Zimmer et al., In Bearbeitung). Der zusätzliche Stromverbrauch im Verkehrssektor wird vollständig durch zusätzliche erneuerbare Erzeugungskapazitäten gedeckt. Im Luftverkehr und der Schifffahrt werden ab dem Jahr 2025 zunehmend alternative Kraftstoffe aus erneuerbaren Quellen eingesetzt, wobei eine mögliche Kostendegression für neue Kraftstoffe erst langsam auftritt. Die Nutzung anbaubasierter Biokraftstoffe wird bis zum Jahr 2030 schrittweise zurückgefahren.

Dieser Entwicklungspfad setzt sowohl bei der Anpassung der Infrastruktur der Stromversorgung (Anpassungen im Verteilnetz) in Deutschland als auch auf Nutzerseite (z.B. Gewöhnung an netzorientiertes Laden) große Anstrengungen voraus, die mit Investitionen und Akzeptanzproblemen verbunden sein können. Durch Investitionen in die Infrastruktur und Fahrzeuge entstehen kurzfristig hohe Kosten für die Verkehrsmittelnutzung<sup>17</sup>. Für die erneuerbaren Kraftstoffe wird die vorhandene Verteilinfrastruktur genutzt.

Vorteilhaft wirkt sich in diesem Entwicklungspfad aus, dass die direkte Nutzung von Strom einen systemisch hohen Wirkungsgrad aufweist und dass sich durch die Stromerzeugung in Deutschland die Importabhängigkeit von Energieträgern verringert. Die Klimaschutzwirkung hängt in diesem Entwicklungspfad stark davon ab, ob die zusätzlichen benötigten Mengen an EE-Strom in Deutschland tatsächlich zur Verfügung stehen und Strom im Verkehrssektor tatsächlich nachgefragt wird, d.h. dass auch wirklich ein Markteinstieg in Elektromobilität gelingt.

*Stromerzeugung für den Verkehrssektor entsprechend heutigem Zielpfad / mittelfristig gradueller Einstieg in alternative Kraftstoffe*

Bei dieser Ausgestaltungsoption liegt der Anteil an alternativen Kraftstoffen im Jahr 2030 bei rund 7 %, was die EU-Vorschläge zur Erneuerbaren Energien Richtlinie-II widerspiegelt. Der Anteil an Biokraftstoffen auf Basis von Anbaubiomasse bleibt auf dem heutigen Niveau eingefroren und der EE-Anteil neuer Stromnachfrage im Verkehrssektor entspricht dem Zielpfad der Bundesregierung von rund 60 % im Jahr 2030.

Dieser Entwicklungspfad ist dadurch gekennzeichnet, dass der Einstieg in erneuerbare Kraftstoffe und die Entwicklung des Stromsektors heutigen politischen Zielen bzw. Regulierungsvorschlägen entsprechen und er damit eine eher wahrscheinliche Entwicklung aufzeigt. Notwendige Entwicklungen werden sowohl im Stromsektor als auch bei der Kraftstoffproduktion vorangetrieben, um in einem eher technologieneutralen Ansatz in den verschiedenen Anwendungsfällen die jeweils geeigneten Energieträger einzusetzen. Neben der direkten Nutzung von Strom kommen fortschrittliche Biokraftstoffe sowie flüssige (PtL) und ggf. gasförmige synthetische Kraftstoffe (PtG-CH<sub>4</sub> und PtG-H<sub>2</sub>) zum Einsatz.

Während im Straßenverkehr auch die direkte Stromnutzung Einzug erhält, werden die alternativen Kraftstoffe im Jahr 2030 im Luft- und Seeverkehr sowie verstärkt auch im Güterfernverkehr eingesetzt werden. Eine Kostendegression für alternative Kraftstoffe setzt stärker als in der vorigen Ausgestaltungsoption ein, die u.a. zur Etablierung von Elektrolyseuren beiträgt.

Trotzdem werden im Vergleich zur direkten Nutzung von Strom die synthetischen Kraftstoffe mit höheren Kosten verbunden sein (Kasten et al., 2016; Perner, 2018). Für die Nutzung von flüssigem PtG-CH<sub>4</sub> und -H<sub>2</sub> sind zusätzlich zu den Investitionen in die Ladeinfrastruktur für Elektrofahrzeuge auch Investitionen in eine angepasste Tankstelleninfrastruktur für CH<sub>4</sub> und im Fall von H<sub>2</sub> in eine neue Verteil- und Tankstelleninfrastruktur notwendig. Somit könnten sich parallele Energieinfrastrukturen für dieselben Verkehrsanwendungen ergeben.

---

<sup>17</sup> In (Kasten et al. 2016) zeigt sich, dass die Kosten für die Anpassung der Infrastruktur vergleichsweise gering sind zu den Kosten für die Anpassung der alternativen Antriebsoptionen.

Aufgrund der Kostenstruktur der erneuerbaren Kraftstoffe ist es wahrscheinlich, dass diese langfristig an geeigneteren Standorten produziert und nach Deutschland importiert werden (Pfennig et al., 2017), wodurch sich neue Importabhängigkeiten ergeben würden. Es ist unsicher, ob ausreichende Mengen nachhaltig erzeugte synthetische und biogene Kraftstoffe für den Verkehr erzeugt werden können. Damit die alternativen Kraftstoffe keinen sozialen oder ökologischen Schaden anrichten, muss die Einführung von synthetischen Kraftstoffen an Nachhaltigkeitskriterien geknüpft werden. .

#### *Fokus auf alternative Kraftstoffe / Schneller Einstieg in alternative Kraftstoffe*

In diesem Entwicklungspfad wird die Klimaschutzwirkung maßgeblich durch die starke und zügige Nutzung von alternativen Kraftstoffen (v. a. synthetische Kraftstoffe) in allen Verkehrsanwendungen erzielt. Da bei einem schnellen Einstiegspfad für synthetische Kraftstoffe die vorhandenen Infrastruktursysteme und Fahrzeugtechnologien genutzt werden würden, würde sich die Entwicklung mit hoher Wahrscheinlichkeit auf „Drop-In“-Kraftstoffe PtL und flüssige Biokraftstoffe konzentrieren, die ohne größere Systemanpassungen (Fahrzeuge, Infrastruktur, Nutzerverhalten) auskommen. PtG-CH<sub>4</sub> und PtG-H<sub>2</sub> finden keine verstärkte Anwendung. Hier wird für das Jahr 2030 von einem Anteil alternativer Kraftstoffe im Verkehrssektor von rund 30 % ausgegangen (Zimmer et al., In Bearbeitung).

Um die v.a. kurzfristig sehr viel höheren Energiekosten (Perner, 2018) und den im Vergleich zur direkten Nutzung von Strom höheren Primärenergieverbrauch zu reduzieren, wäre fahrzeugseitig eine starke Verbesserung der Fahrzeugeffizienz sinnvoll.

Dieser Entwicklungspfad erlaubt einen schnellen hohen Klimaschutzbeitrag, da die Klimawirksamkeit im gesamten vorhandenen Bestand wirken und die vorhandene Verteilinfrastruktur genutzt werden kann. Voraussetzung dafür ist allerdings, dass die alternativen Kraftstoffe auch wirklich THG-arm bzw. THG-frei sind und umfassenden Nachhaltigkeitsansprüchen genügen. Daher besteht eine sehr große Abhängigkeit von der Verfügbarkeit von nachhaltig erzeugten synthetischen Kraftstoffen, deren kurzfristiges, aber auch langfristiges Mengenpotenzial aus heutiger Sicht nicht stichhaltig abzuschätzen ist. Auch wäre in diesem Szenario eine sehr zügige Einführung von Nachhaltigkeitskriterien für synthetische Kraftstoffe notwendig.

### **Gegenüberstellung der Ausgestaltungsmöglichkeiten**

Die drei dargestellten Entwicklungspfade beschreiben den Einstieg in Verkehrssysteme, die zur Erreichung der Klimaschutzziele führen können. Aufgrund der unterschiedlichen Einstiegspfade wird sich auch mit hoher Wahrscheinlichkeit das Zielsystem im Jahr 2050 zwischen den drei Pfaden in Bezug auf die genutzten Antriebstechnologien und Energieträger unterscheiden. Aufgrund der unterschiedlichen Abhängigkeiten (z. B. Verfügbarkeit PtL, Entwicklung der Antriebstechnik) können sich u. U. auch Unterschiede beim THG-Minderungsniveau über den Zeitverlauf ergeben.

In den folgenden Punkten unterscheiden sie sich wesentlich.

Der **Primärenergieverbrauch**, und damit der Bedarf an zusätzlich in Deutschland und international zu installierender EE-Erzeugungskapazitäten, variiert deutlich. Je höher der Anteil von synthetischen Kraftstoffen ist, desto höher ist wegen der Wandlungsverluste der Primärenergieverbrauch. Bei Nutzung von stromgenerierten Kraftstoffen besitzt PtL im Vergleich zu PtG-H<sub>2</sub> einen wesentlich niedrigeren Wirkungsgrad. Die Agora Verkehrswende beziffert den Strombedarf des Verkehrs in Deutschland für ein Szenario „strombasierte Kraftstoffe“ mit einem hohen Anteil an strombasierten Kraftstoffen auf 914 TWh. Der Verbrauch liegt damit um rund 70 % über dem Szenario „direkte Stromnutzung“ und deutlich über der Bruttostromerzeugung in Deutschland im Jahr 2016 (Agora Verkehrswende, 2017). Weiterhin kann sich die **Auswirkung auf das deutsche Energiesystem** unterscheiden. Während die für die schnell ansteigende Stromnachfrage benötigten erneuerbaren Erzeugungskapazitäten für die direkte Nutzung von Strom frühzeitig zusätzliche Flexibilitätsoptionen erforderlich machen, wären bei einer zeitgleichen Ladestromnachfrage ggf. Netzanpassungen und die Einführung netzdienlicher Ladekonzepte notwendig (Timpe et al., 2017). Bei Nutzung der erneuerbaren Kraftstoffe ist es möglich, diese global gesehen an besonders geeigneten Standorten mit niedrigeren Stromgestehungskosten herzustellen und nach Deutschland zu importieren.

Das Potenzial an Biomasse als regenerativem Rohstoff zur Erzeugung von Biokraftstoffen (sowohl Anbaubiomasse als auch Biokraftstoffe der 2. Generation) steht in Deutschland nur begrenzt zur Verfügung. Zudem kann eine Konkurrenz für verschiedene Nutzungsoptionen bestehen (z. B. Konkurrenz um Flächen, stoffliche Nutzung, Nutzung in der chemischen Industrie) (Kreyenberg et al., 2015).

Durch den **Import synthetischer und biogener Kraftstoffe** entstehen nicht nur neue Abhängigkeiten., Auch die mit der Produktion der für den deutschen Verkehrssektor benötigten Energieträger ver-

bundenen negativen Umweltauswirkungen wie z. B. Flächeninanspruchnahme und Wasserverbrauch entstehen dann in den exportierenden Ländern. Wird hingegen zusätzlicher Strom aus Deutschland genutzt, findet die mit der Erzeugung verbundene Wertschöpfung auch hier statt. Dies ist mit positiven ökonomischen Auswirkungen (z. B. Arbeitsplätze für Installation, Wartung und Instandhaltung) verbunden. Allerdings dürfte der Energiebedarf die Potenziale zur Erzeugung an geeigneten Standorten in Deutschland übersteigen. Zudem sind die Kostenpotenziale außerhalb Deutschlands eindeutig vorteilhaft, so dass die unterschiedlichen Klimaschutzpfade zu unterschiedlich starken Energieimporten nach Deutschland und Importabhängigkeiten führen (Perner, 2018).

Alle drei Entwicklungsoptionen führen zu **Zusatzkosten** im Vergleich zur Nutzung fossiler Kraftstoffe. Diese Zusatzkosten können z. B. auf Seiten der Energieträger, der Infrastruktur und der Fahrzeuge auftreten. Die gesamten Zusatzkosten sind im Falle einer direkten Nutzung von Strom (Zusätzlicher Ausbau der EE-Stromkapazitäten) im Straßennah- und -fernverkehr geringer als bei der Nutzung von alternativen Kraftstoffen (Kasten et al., 2016).

Die Nutzung von alternativen „Drop-In“-Kraftstoffen ist mit einem geringeren Bedarf für **Verhaltensänderungen** verbunden. Die notwendigen Verhaltensänderungen sind also bei den Entscheidungspunkten, die für den Verkehrssektor mit neuen Energieträgern verbunden sind, stärker. Diese benötigten Verhaltensänderungen können zu Akzeptanzproblemen führen. Der Infrastrukturausbau (Stromnetze) und zusätzlicher Ausbau an erneuerbaren Erzeugungskapazitäten stößt in Deutschland ebenfalls häufig auf eine geringe Akzeptanz (Trapp et al., 2017), was sich negativ auf den Entwicklungspfade mit einem schnellen Umstieg auf regenerativen Strom auswirken könnte. Andererseits ist die Einführung von Biokraftstoffen auf Basis von Anbaubiomasse u.a. auch an der geringen Akzeptanz gescheitert.

**Externe Treiber** die die Pfadentscheidung beeinflussen wirken sich unterschiedlich stark auf die drei Entwicklungsoptionen aus. Die sich verschärfende Diskussion um Luftschadstoffbelastung und Lärm in Städten, die auch in Deutschland ein Verbot von verbrennungsmotorischen Fahrzeugen in Innenstädten zur Folge haben könnte, kann einen äußerst starken Effekt auf die Nachfrage verschiedener Energieoptionen mit sich bringen. Die zukünftige Ausgestaltung der EU-Gesetzgebung in Bezug auf die Fortschreibung der CO<sub>2</sub>-Flottengrenzwerte und die vorgeschriebenen Anteile an erneuerbaren Kraftstoffen werden auf alle drei Entwicklungsoptionen und die damit zusammenhängende Entwicklung auf Fahrzeugseite einen großen Einfluss besitzen.

## Stakeholder-Positionen

### Umweltverbände

Greenpeace fordert für eine effektive Verkehrswende den Einsatz von Elektrofahrzeugen in Flotten und eine Terminierung für einen Zulassungsstopp von Fahrzeugen mit Verbrennungsmotor. Für den auf der Straße verbleibenden Güterfernverkehr sollen elektrische Oberleitungs-Lkw genutzt werden. Für Transporte, für die die direkte Nutzung von Strom nicht möglich ist, sollen synthetische Kraftstoffe eingesetzt werden (Greenpeace, 2016 und Rudolph et al., 2017).

In den von Greenpeace erstellten Langfristszenarien Energy [R]evolution - a sustainable world energy outlook 2015 (Teske et al., 2015) wird für das Jahr 2050 von einem Kraftstoffmix ausgegangen. Im ambitioniertem ADV E[R]-Szenario beträgt der globale Endenergieverbrauch im Jahr 2050 im Verkehrssektor rund 54 EJ/a, davon entfällt mit rund 5,4 EJ (Synthetische Kraftstoffe) und 14 EJ (Wasserstoff) rund ein Drittel auf PtX-Kraftstoffe und mit 7,8 EJ rund 14 % auf Biokraftstoffe und Biogas.

### Automobilindustrie

Der Verband der Deutschen Automobilindustrie (VDA) bezeichnet die Nutzung von synthetischen Kraftstoffen in hocheffizienten Verbrennungsmotoren als vielversprechenden Weg zu Senkung der Treibhausgasemissionen im Verkehrssektor. Die vom VDA beauftragte Studie „E-Fuels Study“ (Siegemund et al., 2017) kommt zum Ergebnis, dass der Energiebedarf im Jahr 2050 zu mehr als 70 % durch synthetische Kraftstoffe gedeckt werden könnte, wobei davon ein Großteil auf Flug-, Schiff- und Straßengüterverkehr entfallen würde. Um den Hochlauf und die Verbreitung von synthetischen Kraftstoffen anzustoßen, fordert der VDA eine Gutschrift der CO<sub>2</sub>-Minderung auf die in der Weiterentwicklung befindlichen EU- Flottenzielwerte für Pkw und leichte Nutzfahrzeuge. Das Potenzial von Biokraftstoffen der 2. und 3. Generation wird vom VDA mit 11% des heutigen Energiebedarfs beziffert (Siegemund et al., 2017).

### Luftfahrtindustrie

Laut dem Bundesverband der Deutschen Luftverkehrswirtschaft (BDL) ist es Ziel der Luftverkehrsbranche, ab dem Jahr 2020 CO<sub>2</sub>-neutral zu wachen und langfristig bis zum Jahr 2050 die CO<sub>2</sub>-Emissionen

um 50 % gegenüber 2005 zu reduzieren (Pfeiffer, 2012). Neben betrieblichen und technischen Effizienzmaßnahmen stehen neue Technologien und alternative Kraftstoffe im Vordergrund der CO<sub>2</sub>-Minderungsstrategie. In ersten Tests wurde gezeigt, dass der Einsatz von Biokraftstoffen in der Luftfahrt technisch möglich ist. Für die Entwicklung hin zur Marktreife fordert der BDL eine verstärkte Forschung und Entwicklung alternativer Kraftstoffe sowie einer Förderung, um deren Anwendung marktfähig zu machen. Für das Jahr 2025 wird das Ziel eines Anteils von 10 % genannt. Für synthetische Kraftstoffe werden keine expliziten Ziele aufgeführt.

#### **Internationale Schifffahrt**

Die Diskussion zu Kraftstoffen in der Seeschifffahrt wird aktuell stark beeinflusst von der Frage nach den Luftschadstoffemissionen und dreht sich zunehmend um LNG als alternativen Kraftstoff (z. B. VDR (2015)). Mittlerweile setzt sich in der Schifffahrt die Erkenntnis durch, dass die Verwendung fossiler Kraftstoffe langfristig zurückgehen wird. So nennt bspw. das ICS (International Chamber of Shipping) (Einemo, 2017) einen zeitlichen Rahmen von 25 Jahren, in dem die Nachfrage nach fossilen Kraftstoffen signifikant zurückgehen könnte (Einemo, 2017).

Hinsichtlich der neuen Kraftstoffe besteht noch keine Einigkeit. Neben der Verwendung von Biokraftstoffen werden teilweise auch elektrische Antriebskonzepte und die Verwendung von Wasserstoff diskutiert (Kinthaert, 2017).

#### **Mineralölwirtschaft**

Das Unternehmen Shell aus der Mineralölwirtschaft hat mit den Shell PKW-Szenarien (Adolf et al., 2014) und der Shell Nutzfahrzeug-Studie (Adolf et al., 2016) Langfristszenarien für den Straßenverkehr in Deutschland veröffentlicht, die sowohl für die Pkw als auch die schweren Nutzfahrzeuge überwiegend auf flüssige oder gasförmige Kraftstoffe setzen und dabei nur von geringen Anteilen an beigemischten Biokraftstoffen ausgehen (20 % in 2040 (Trendszenario Nutzfahrzeug-Studie). Der Anteil von Strom und Wasserstoff am Energieverbrauch in Fahrzeugen mit alternativen Antrieben ist in den Szenarien gering. Beide Szenarien setzen stark auf die Verbesserung der Energieeffizienz der Fahrzeuge. Andererseits ist Shell als Partner der H2Mobility aktuell mit der Errichtung eines Netzes von 400 H<sub>2</sub>-Tankstellen involviert.

Ein weiterer Anwendungsfall für PtG-H<sub>2</sub> wird in der Verwendung in Raffinerieprozessen gesehen (Shell Deutschland Oil GmbH, 2017). Auch BP sieht in der Erzeugung von PtG-H<sub>2</sub> die Möglichkeit, regenerativ erzeugten Wasserstoff im Raffinerieprozess stofflich zu verwenden, z. B. für die Entschwefelung von Dieselkraftstoffen, bei der heute H<sub>2</sub> aus fossilen Quellen verwendet wird. Damit würde PtG-H<sub>2</sub> dem Verkehrssektor indirekt zugeführt. BP weist auf die höhere Energieeffizienz dieses Nutzungspfades im Vergleich zur Wiederverstromung hin. Zur Unterstützung fordert BP die Anrechnung des PtG-H<sub>2</sub> auf die Biokraftstoffquote (BP Europa SE & Uniper SE, 2017).

#### **Gaswirtschaft**

Der Branchenverband der Gas- und Wasserwirtschaft DVGW betrachtet Power-to-Gas als Schlüsseltechnologie der Energiewende. Er fordert eine Förderung der Markteinführung bis zum Jahr 2030 in Form von CO<sub>2</sub>-Zertifikaten. Der DVGW sieht Vorteile von PtG u.a. in der Möglichkeit der Nutzung vorhandener Gasinfrastrukturen, ein auf lokaler und regionaler Ebene verringerter Netzausbau und in der Verwendung von PtG als saisonalem Energiespeicher (Deutscher Verein des Gas- und Wasserfaches e.V., 2017).

#### **Biokraftstoffindustrie**

Der Verband der Deutschen Biokraftstoffindustrie (VDB) kritisiert die Erneuerbare-Energien-Richtlinie II scharf. Durch die im Entwurf beinhaltete Fokussierung auf Biokraftstoffe der 2. Generation aus Abfällen und Reststoffen sowie Elektromobilität würde bis zum Jahr 2030 die Nutzung fossiler Kraftstoffe deutlich ansteigen und die Dekarbonisierung scheitern (Verband der Deutschen Biokraftstoffindustrie, 2016).

Der Bundesverband der deutschen Bioethanolwirtschaft (BDBe) bezeichnet die vorgesehene Förderung von Biokraftstoffen aus Reststoffen und Abfällen als richtig. Allerdings äußert der Verband ebenso wie der VDB Kritik an der vorgesehenen Absenkung des Anteils von Biokraftstoffen aus Futtergetreide, Industrierüben und Pflanzenöl von 7 % auf 3,8% im Jahr 2030, da sie eine dringend erforderliche zusätzliche Alternative zu fossilen Kraftstoffen darstellen würden (Bundesverband der deutschen Bioethanolwirtschaft, 2016).

#### **Weitere zivilgesellschaftliche Akteure**

Der Think Tank Agora Verkehrswende sieht in strombasierten Kraftstoffen eine Ergänzung zur direkten Nutzung von Strom. Der Einsatz synthetischer Kraftstoffe sollte auf die den Luftverkehr und die Seeschifffahrt vorbehalten bleiben, für die eine direkte Stromnutzung nicht in Frage kommt (Perner, 2018).

### 3.3.3. Nutzerverhalten und Mobilitätsdienstleistungen: Sharing und multimodale Mobilität im urbanen Kontext

#### Fragestellung/Problemaufriss

Das Urteil des Bundesverwaltungsgerichts in Leipzig und die Klage der EU-Kommission gegen Deutschland machen deutlich, dass großer Handlungsbedarf in Städten besteht, die Luftqualität und Gesundheit ihrer Bewohner wirksam zu schützen. Verursacht werden die seit längerem bekannten und drängender werdenden Probleme v.a. durch den hohen Gebrauch von Diesel-Pkw. Doch auch Benzin-Pkw verursachen Lärm, Abgase und beanspruchen viel Raum. Im Durchschnitt werden private Pkw in Deutschland eine Stunde pro Tag genutzt und die Auslastung der Fahrzeuge ist ebenfalls ineffizient niedrig, sie liegt bei durchschnittlich 1,5 Personen (DLR/Infas 2010).

Insbesondere in Städten liegt ein besonderes Emissionsminderungspotenzial in Sharing-Angeboten und kollaborativer Mobilität, sowie der flexiblen Nutzung verschiedener Verkehrsmittel (multimodale Mobilität). Diese ermöglichen eine deutliche Reduktion von ruhendem Pkw-Verkehr, sowie eine weitaus effizientere Nutzung von Verkehrsmitteln. Doch Sharing-Angebote und multimodale Mobilität benötigen geeignete Stellflächen und eine intelligente Vernetzung der Angebote. Mit dem Carsharing-Gesetz wurde hier ein erster Schritt erreicht, auch wenn die Überführung in die für die Kommunen relevante Landesgesetzgebung noch aussteht. Doch die konkrete Ausgestaltung und Umsetzung obliegt dann den Städten. Das Carsharing-Gesetz ist lediglich eine Ermöglichung zur Ausweisung von Carsharing-Stellplätzen, jedoch keine starke Förderung ebendieser, dringend benötigten, Stellplätze.

Im urbanen Kontext gilt es dabei auch den Warenverkehr zu berücksichtigen, der eine weitere Herausforderung darstellt. Allein der Anteil der Online-Käufer ist von ca. 10 % (im Jahr 2000) auf mittlerweile 68% (im Jahr 2016) angestiegen (Statista 2018), wodurch das Verkehrsaufkommen im Bereich Lieferdienste stark gestiegen ist. Gleichzeitig zeigen neue Lieferdienste wie Foodora oder Deliveroo innovative, digital vernetzte Wege auf, Lieferungen im Nahbereich umweltfreundlich zu organisieren. Für den Transport anderer Waren kommen postfossile Lösungen wie der Transport mit zwei- oder dreirädrigen Lastenrädern in Frage. Nach Schätzungen des DLR Berlin könnten 8 bis 23 % aller Lieferfahrten in Städten durch Lastenräder ersetzt werden, je nach Szenario (Gruber & Rudolph, 2016, S. 52). Aktuell arbeiten neben spezialisierten Lastenrad-Logistikanbietern auch DHL bereits mit einer Lastenrad-Flotte für die Paketzustellung. Die seit kurzem vom Bund eingerichtete Kaufprämie für gewerblich genutzte Schwerlasträder flankiert diese Entwicklungen positiv. Darüber hinaus kommt der Einsatz von Drohnen für die Auslieferung von Waren in Frage. Durch ungeklärte Fragen der Governance und Geschäftsmodellentwicklung ist die Implementierung hier jedoch zunächst noch ungewiss.

Die Auslastung von Pkw und die Etablierung multimodaler Mobilitätspraktiken kann durch die Fokussierung auf Sharing-Angebote gefördert werden. Dabei käme es zu einer Änderung sowohl des Kauf- als auch des Nutzungsverhaltens der privaten und gewerblichen Mobilitätsnutzer. Es würden deutlich weniger Fahrzeuge selbst angeschafft und die Nutzung verändert sich stark in Richtung Multimodalität. Diese Entwicklung wird durch die voranschreitende Entwicklung der Automatisierung und digitaler Dienste/ Apps unterstützt, die verschiedene Mobilitätsoptionen in einem Bezahlsystem integrieren und damit einen großen Komfortvorteil für die Nutzer schaffen.

Die folgende Tabelle gibt eine Übersicht, welche Ausgestaltungsmöglichkeiten sich beim Sharing und der multimodalen Mobilität bieten und mit welchen Vor- sowie Nachteilen dies einhergehen würde.

*Tabelle 20: Übersicht über Möglichkeiten der Emissionsreduktion durch Sharing und Multimodalität im urbanen Kontext (Quelle: Eigene Darstellung)*

Möglichkeit	Beschreibung	Pro	Contra
Sharing und Multimodalität bleiben eine Nischenpraxis	Sharing führt ein Nischendasein und wird nur von relativ jungen, digital-affinen Nutzern nachgefragt. Privater Pkw-Besitz und damit verbundene	keine tiefgreifenden Verhaltens-änderungen notwendig Angebotsvielfalt für Nutzer steigt Pkw-Besitz kann weiter als Symbol sozialer Dis-	Zeitverluste durch Stau hohe Unfallrisiken für Radfahrer und Fußgänger durch platzintensiven ruhenden MIV

	ner Flächenbedarf bleiben weiter hoch	tinktion fungieren keine Infrastrukturände- rungen notwendig	kein Zugang zu gelegentlicher Pkw- Mobilität/ Trans- portkapazität für Geringverdiener „Wildwuchs“ ver- sch. Anbieter/ Flot- ten
Sharing und Multi- modalität werden dominante Praktiken	Privater Pkw-Besitz sinkt deutlich Verkehrsmittelnutzung wird flexibler (multi- modal) Infrastruktur wird an inter- und multimodale Mobilitätsbedürfnisse angepasst; Logistik- Hubs werden einge- richtet	Effizienzgewinne durch höhere Auslastung von Pkw große Fortschrit- te bei Luftrein- haltung in Städ- ten Reduktion kommunaler Kosten für Pkw- Stellplätze erhöht Sicherheit für aktive Modi (Rad/Fuß), da Kreuzungen besser einsehbar sind Lebensqualität steigt Soziale Fairness und Akzeptanz Ausbau innovativer Wirt- schaftszweige und Jobs in einer neuen „Mobili- tätswirtschaft“	Gefahr von Rebound-Effekten der Pkw-Nutzung erfordert Umstruk- turierungen Auto- mobilhersteller evtl. Datenschutz- probleme nicht vollständig auf ländliche Räume übertragbar

### Unsicherheiten und externe Treiber

voranschreitende Digitalisierung wirkt förderlich auf Sharing und Multimodalität  
Entscheidung und Ausgestaltung von autonomen Fahrzeugen  
Regulative Entscheidungen zu Fahrbeschränkungen in Städten (Fahrverbote)

### Wechselwirkungen mit anderen Richtungsentscheidungen

bei starker Ausprägung: frei werdende Flächen des ruhenden MIV können für sichere Rad-  
Abstellplätze genutzt werden (fördert Rad-Modal Split) und für Spielplät-  
ze/Aufenthaltsqualität im öffentlichen Raum (erhöht das Sozialkapital)  
Stadtentwicklungspolitik und Infrastrukturpolitik, z.B. fehlende Mietpreisregulierung in Innen-  
städten produziert neue Mobilitätsbedarfe (Pkw-Einpendeln aus Randbezirken)

### Beschreibung der Ausgestaltungsmöglichkeiten

#### *Business as usual: Sharing und Multimodalität als Nischenpraxis*

Diese Ausgestaltungsmöglichkeit entspricht der im obigen Problemaufriss dargestellten Situation. Das heißt, eine Vielfalt an Sharing-Angeboten existiert zwar weiter, sie werden jedoch nicht zum  
Mainstream. Damit werden viele neue Anbieter mittelfristig kein erfolgreiches Geschäftsmodell außer-  
halb der Nische finden, da sie für ihren Erfolg eine kritische Masse an Nutzern benötigen. Es ist ungewiss, ob Kommunen weiterhin Bikesharing-Flotten bezuschussen werden, da Bikesharing zwar als  
Symbol von Innovation und Umweltschutz gesehen wird, jedoch auch mit erheblichen Betreiberkosten  
verbunden ist (Fishman et al. 2013). Auch beim Carsharing ist ungewiss, ob sich free-floating Systeme  
rentieren, da die Anbieter (z.B. Car2Go, DriveNow) keine Zahlen dazu veröffentlichen. Dass Volkswa-

gen sein Carsharing-Angebot Quicar in Hannover im Jahr 2016 wieder eingestellt hat und die Fusion von Car2Go und DriveNow zeigen die Unruhe im Carsharing-Anbieter-Markt. Das stationsbasierte Carsharing (z.B. Stadtmobil, Cambio), befindet sich dagegen in einem recht stabilen Gleichgewicht von Angebot und Nachfrage, mit steigender Tendenz.

Emissionsfreie letzte-Meile Transporte bleiben eher Experimentierfelder und werden von fehlender kommunaler Infrastrukturanpassung gehemmt. Erfolgreiche Lastenrad-Logistik ist auf die Bereitstellung adäquater Stellflächen und Mikro-Depots für die Feinverteilung angewiesen. Hier fehlt es aktuell an Planungskompetenz und Durchsetzungswillen in den Kommunen, die entsprechende Infrastruktur schnell und in ausreichendem Umfang bereitzustellen.

Insgesamt werden Sharing und Multimodalität damit nur einen sehr eingeschränkten Nutzerkreis erreichen, v.a. die jüngeren und digital-affinen Nutzer. Die erhofften Skaleneffekte und die kritische Nutzermasse bleiben damit sowohl im Personen- als auch im Güterverkehr aus und es kommt nicht zu einer disruptiven Veränderung. Dementsprechend bleiben die Umwelt- und Gesundheitsbelastungen des MIV in Städten unvermindert hoch.

#### *Sharing und Multimodalität werden dominante Praktiken*

Bei diesem Entwicklungspfad verlassen Sharing und multimodale Mobilität die Nische und werden zur dominanten Mobilitätspraxis. Damit ist eine starke Senkung des privaten Pkw-Bestands verbunden. MIV-Stellflächen in Städten werden frei für alternative Nutzungen wie Grünflächen oder Spielplätze. Kommunale Entscheider widmen insbesondere Pkw-Stellflächen zu einem signifikanten Teil um in Stellflächen für Carsharing, Bike-Sharing und Lastenrad-Sharing. Für die geteilte Nutzung von Lastenrädern ist ein hoher Reduktionseffekt von Pkw-Fahrten nachgewiesen: 46% der Lastenrad-Sharing-Nutzer hätten für ihre Transportfahrt einen Pkw genutzt, wenn kein Sharing-Angebot verfügbar gewesen wäre (Becker & Rudolf, 2018). Die private Anschaffung und Wartung von geteilten Lastenrädern kann politisch durch eine entsprechende Anschubfinanzierung auf Bundesebene gefördert werden, so wie es bereits in Graz und vielen weiteren Städten der Fall ist.

Der Bedarf an privatem Pkw-Besitz sinkt, aber die Auslastung der privaten Pkw würde durch Carsharing in seinen verschiedenen Formen sinken: stationsbasiertes Carsharing mit flächendeckendem Netz von Ausleihstationen, dessen positiver Autoreduktionseffekt vielfach bestätigt wurde (Baptista et al. 2014; Martin et al. 2010); free-floating Carsharing für one-way Fahrten in Ballungsräumen; peer-to-peer Carsharing zur Abdeckung suburbaner und auch ländlicher Gebiete und zur Bereitstellung besonders kostengünstiger Leihauto-Angebote. Die damit verbundenen Effizienzgewinne senken den Energie- und Ressourcenbedarf für die Herstellung von Pkw, aber auch für den Betrieb und die Entsorgung von Pkw. Darüber hinaus erfahren die Nutzer von Sharing-Mobilität einen Gewinn an Lebensqualität gegenüber der Pkw-Besitzsituation durch mehr Flexibilität und geringere Mobilitätskosten (Stocker et al., 2016). Ein weiterer sozialer Vorteil der Sharing-Mobilität ist, dass sie Zugang und Teilhabe für alle potenziellen Mobilitätsnutzer schafft. Dies würde den Verteilungsgerechtigkeiten im aktuellen Pkw-dominierten Verkehrssystem entgegenwirken (Ohnmacht et al. 2009).

Durch die frei gewordenen Pkw-Stellflächen steigt die Verkehrssicherheit an Kreuzungen für Radfahrer und Fußgänger, da Kreuzungen ohne parkende Pkw für alle Verkehrsteilnehmer besser einsehbar sind. Darüber hinaus sinken die Kosten für die Bereitstellung von Pkw-Stellplätzen (Shoup 2017). Den Vorteilen dieses Entwicklungspfades stehen jedoch auch einige Risiken gegenüber. Free-floating Carsharing und digital vermitteltes Ridesharing (z.B. UBER) können mit Rebound-Effekten einhergehen. Insbesondere dann, wenn die Kosten für eine Pkw-Nutzung pro Person und Strecke nur leicht über den ÖPNV-Nutzungskosten liegen. Das Rebound-Risiko würde aber am stärksten steigen, wenn automatisierte Fahrzeuge zu sehr günstigen Preisen pro Nutzungseinheit als neue Mobilitätsdienstleistung angeboten werden.

Eine weitere Problematik dieses Entwicklungspfades sind Datenschutzbedenken. Informationen darüber, wer sich wann mit welchem Verkehrsmittel wohin begibt, sind „wertvolle“ und zugleich sehr persönliche Daten. Auf Seiten der Nutzer könnten Bedenken darüber, wer ihre Mobilitätsdaten, die im Zuge der Nutzung digital vermittelter Mobilitätsdienstleistungen gesammelt werden, verarbeitet. Hier ist der Gesetzgeber gefragt, frühzeitig und effektiv die Verwendung von mobilitätsbezogenen Daten zu regulieren. Andernfalls könnte die Akzeptanz für digital vermittelte Mobilitätsdienstleistungen im Sharing-Bereich sinken.

Durch die Verringerung der Pkw-Nachfrage wird die Automobilindustrie einen Strukturwandel durchlaufen. Konkurrenzfähig bleiben nur diejenigen Automobilfirmen, die sich grundlegend neu ausrichten und

integrierte Mobilitätsdienstleistungen anbieten. In diesem Sektor der Mobilitätsdienstleistung entstehen aber auch neue Jobs (FVEE, 2010).

## Stakeholder-Positionen

Prominente Vertreter des Sharings sind verständlicherweise der Bundesverband Carsharing, aber auch die Deutsche Bahn, die im Gegensatz zu den Automobilherstellern recht früh erkannt hat, dass sie in Zukunft nicht nur ein Verkehrsmittel sondern möglichst integrierte Mobilitätsdienstleistungen anbieten sollte (Fernzug + CityTicket, Call-a-bike, Flinkster, IC Bus). Es gibt kaum Akteure, die sich offen gegen eine Intensivierung von Sharing- Angeboten aussprechen. Durch den kürzlich ins Spiel gebrachten Vorschlag der Bundesregierung als Reaktion auf das drohende Vertragsverletzungsverfahren (Cames & Deuber, 2003) der EU-Kommission, partiell kostenlosen Nahverkehr anzubieten, ist allerdings eine neue Dynamik in die Debatte gekommen. Das Echo bei Kommunen und Betreibern fällt sehr gemischt aus. Sowohl Kommunen als auch Verkehrsbetriebe wollen aber vermeiden, dass Bürger/innen nunmehr einen kostenlosen Nahverkehr *verlangen* und ihre Zahlungsbereitschaft sinkt. Die Verkehrsbetriebe befürchten außerdem einen sehr großen und plötzlichen Zuwachs an Nutzern, den sie möglicherweise mit den aktuellen Kapazitäten nicht bewältigen können.

Vereinzelt sind skeptische Stimmen gegenüber der Umwidmung von Stellflächen für Sharing-Zwecke aus den Reihen von Kommunalpolitikern und Wirtschaftsverbänden wie der IHK zu vernehmen. Für den Einzelhandel wird vielfach eine Verringerung der Kundschaft befürchtet, wenn vor Ort nicht genügend Pkw-Parkplätze zur Verfügung gestellt werden. Demgegenüber fördern jedoch Rad-Stellplätze und Rad-Infrastruktur die Kaufkraft im Stadtviertel vor Ort, wie der ADFC unterstreicht.

### 3.3.4. Stadtplanung und Umbau der Verkehrsinfrastruktur in Städten: mehr Nahmobilität und Radverkehr

#### Fragestellung/Problemaufriss

Menschen haben Bedürfnisse und Wünsche. Liegen die Möglichkeiten zu ihrer Erfüllung weit auseinander – wie zum Beispiel Möglichkeiten zum Wohnen, Arbeiten, Einkaufen, sich bewegen, zur Erholung und Freizeitgestaltung, müssen Menschen mobil sein, um ihre Bedürfnisse und Wünsche an verschiedenen Orten zu befriedigen.

Die vorhandene Infrastruktur, geprägt durch Stadtplanung, spielt dabei eine essenzielle Rolle. Einerseits geben Orte vor, welche Bedürfnisse und Wünsche wo befriedigt werden können, andererseits legen die vorhandene Verkehrsinfrastruktur und das Verkehrsangebot nahe, mit welchem Verkehrsmittel man schnell, sicher und bequem zum Ziel kommt.

Beispielsweise ist gute Radverkehrsinfrastruktur als Voraussetzung für hohe Radverkehrsanteile beschrieben worden (Bartle et. al 2016; Rissel et. al 2015; Song et. al 2017). Gibt es Radverkehrsanlagen, werden dort mehr Radfahrende beobachtet als auf Straßen ohne spezielle Infrastrukturen (Marques et. al 2015; Pistoll & Goodman 2014). Allerdings führen neue Infrastrukturen nicht automatisch zu Nutzung (Scheepers et. al 2014; Song et. al 2017); insbesondere in Kombination mit kommunikativen Maßnahmen sind Steigerungen des Radverkehrsanteils erzielt worden (Lanzendorf & Busch-Geertsema 2014).

Ein Hindernis auf dem Weg zur Dekarbonisierung des Verkehrssystems ist daher Infrastruktur in den Städten. Die Pfadentscheidung liegt hier in der Frage: Wie stark wirkt die Politik darauf hin, Nahversorgung und Nahmobilität zu stärken, und Fernmobilität zu begrenzen?

Dies ist insbesondere vor dem Hintergrund folgender anderer Probleme des aktuellen Verkehrssystems zu betrachten:

Arbeits-, Wohn-, und Einkaufs- und Freizeitorte liegen zum Teil weit auseinander. Die Pendlerpauschale unterstützt das Auseinanderfallen von Wohn- und Arbeitsort steuerlich, obwohl Pendeln tendenziell der Gesundheit abträglich zu sein scheint (obwohl es vermittelnde Faktoren gibt) (Handy & Thigpen 2018; Lorenz 2018; Nie & Sousa-Poza 2018; Oliveira et. al 2015; Rüger et. al 2017; Tajalli & Hajbabaie 2017; Urhonen et. al 2016). Das Dienstwagenprivileg fördert den Besitz von Autos, und Autobesitz fördert dessen Nutzung. Es wird derzeit wesentlich mehr Geld in den Erhalt und Ausbau von Autostraßen gesteckt, als in Radinfrastruktur (Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur 2016b; 2017c). Die Menschen bewegen sich zu wenig und die Luft ist in vielen Städten schlecht. Besonders zu Stoßzeiten gibt es oft Stau. Städte sind für Kinder zu gefährlich, um diese

draußen spielen zu lassen, oder diese alleine Wege bewältigen zu lassen. Auch andere schwächere Verkehrsteilnehmer fühlen sich im aktuellen Verkehrsgeschehen auf dem Rad oft unsicher. Private PKW bekommen viel öffentlichen Raum eingeräumt; dies stellt eine Ungleichbehandlung der Verkehrsteilnehmer (Strößenreuther 2014; VCD Verkehrsclub Deutschland e.V. 2016) dar.

Der bestehende Straßenraum ist knapp und seine Instandhaltung ist teuer. Zwar wachsen die Fahrradnetze, allerdings wird die Qualität nicht systematisch erfasst (Monheim et. al 2016). Ebenso wachsen die Ausgaben für Kommunikation, sind aber eher eklektisch vorhanden. Wo Radverkehr und ÖPNV unattraktiv sind, zum Beispiel da sie schlecht verknüpft sind, zu wenig Fahrradstellplätze vorhanden sind, Radwege inadäquat (gefährlich, schmal etc.) sind, wird dies nicht planmäßig angegangen.

*Tabelle 21: Übersicht über Möglichkeiten der Emissionsreduktion durch Stadtplanung und Verkehrsinfrastruktur (Quelle: Eigene Darstellung)*

<b>Möglichkeit</b>	<b>Beschreibung</b>	<b>Pro</b>	<b>Contra</b>
Business as usual (BAU): Motorisierter Verkehr weiterhin im Zentrum der Verkehrsinfrastruktur	Weiter wie bisher: es gibt Radinfrastruktur und ÖPNV, Investitionen in Autostraßen sind jedoch deutlich größer Es gibt experimentell Projekte, die aktive Transportmodi ausprobieren; diese werden jedoch nicht flächendeckend gefördert Autobestand steigt (Kraftfahrtbundesamt 2018) Ressourcenintensive Lebensstile dürfen sich in den aktuellen Rahmenbedingungen ungebremst weiterentwickeln	Kein Umbau nötig Keine gesellschaftlichen Konflikte durch Umbau Keine Umstellung von Mobilitätsroutinen notwendig Bestehende Marktteilnehmer können in gewohnter Gesetzlandschaft agieren, keine wirtschaftlichen Einbußen	Klimaschutzziel wird nicht erreicht (KlimaAktiv 2018) Gesundheitsprobleme durch Bewegungsmangel bleiben bestehen Ungleichheiten durch stark lärmbelastete Gebiete bleiben bestehen Luftschadstoffe steigen Behinderung innovativer Marktteilnehmer
Umbau der Nahverkehrsinfrastruktur mit Fokus auf ÖPNV und Fahrrad vor allem in Städten	Ausbau der Radinfrastruktur in Städten Autobestand stagniert	Umbau nur in Städten, die für Experimente offener sind Experimente verursachen nur zum Teil Konflikte Kleinere Experimente stellen aktuelle Wirtschaftsmodelle nicht grundsätzlich in Frage	Klimaschutzziel wird nicht erreicht Unterschied zw. Stadt und Land wird verstärkt Versorgungspässe auf dem Land
Starker, aktiver Umbau der Nahverkehrsinfrastruktur mit Fokus auf ÖPNV und Fahrrad in Stadt und Land	Massiver Ausbau der Radinfrastruktur in Ballungszentren, Investitionsvolumen vergleichbar mit oder größer als Investitionen in Autoverkehr	Starker Klimaschutzbeitrag Erreichen der Klimaziele möglich, ohne andere ökologische Probleme zu verursachen	Konflikte durch Umverteilung von Fläche, Irritation etablierter Routinen, was ggf. Umstellung notwendig macht

Möglichkeit	Beschreibung	Pro	Contra
	<ul style="list-style-type: none"> <li>· Viel Radverkehr: Stärkung aktiver Transportmodi (Fuß- und Radverkehr) und leichter elektrischer Fahrzeuge (Mikromobilität: E-bikes, Lastenräder, Segways) durch verschiedene Maßnahmen</li> <li>· Stärkung der Nahmobilität u.a. durch Städteplanung</li> <li>· Verringerung des Autobestands</li> </ul> <p>Lebensstilveränderungen</p>	<p>(wenig Ressourcenverbrauch: Fläche für Straßen und Energieerzeugung, Rohstoffe)</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>· Wenig Anpassung nötig im restlichen Energiesystem</li> </ul> <p>Positive Nebenwirkungen auf Gesundheit durch vermiedene Unfälle, Lärmreduktion, Feinstaubreduktion, Bewegung, Stressreduktion</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>· Partielle Beschränkungen des Pkw-Verkehrs notwendig; Einwirkung des Staates/ der Kommune</li> <li>· Kommunikative Maßnahmen notwendig, die zielgruppenadäquat ausgerichtet sind.</li> <li>· Veränderung der Lebensstile notwendig</li> <li>· Umsetzung kann leicht als Rückschritt und Bevormundung empfunden werden</li> </ul>

### Unsicherheiten und externe Treiber

Ausrichtung der Politik, internationale Technologieentwicklung bei Elektroautos, Entwicklung internationaler Trends der Attraktivität von aktivem Verkehr, EU-Recht, Experimentierfreudigkeit von Politik und Bevölkerung

### Wechselwirkungen mit anderen Richtungsentscheidungen

Stärkung des aktiven Verkehrs kann Menge des benötigten Stroms reduzieren (-> Entlastung des Stromsystems).

Durch Reduktion des motorisierten Individualverkehrs (MIV) kann Platz für Umbau und aktiven Nahverkehr etc. frei werden.

Reduktion des MIV bzw. Ersatz durch Elektroautos bringt auch Reduktion von Lärm und Abgasen.

Werden motorisierte Autos komplett durch Elektroautos ersetzt, werden keine Flächen frei.

### Beschreibung der Ausgestaltungsmöglichkeiten

*Business as usual (BAU): kein starker Umbau der Nahverkehrsinfrastruktur*

Die Politik bleibt, wie sie ist: Radverkehr und ÖPNV werden in Städten und Kommunen gefördert, aber weit unter dem Niveau der Investitionen in Autoverkehr. Die Politik setzt weiterhin auf die Verringerung von Stau durch Ausbau von Straßen und induziert dadurch ggf. mehr Autoverkehr. Es werden weiterhin neue Straßen gebaut, obwohl schon die Instandhaltung der aktuellen Straßen an finanzielle Grenzen kommt. Autoverkehr behält seine Priorität in Bau, Planung und Ausgestaltung. Es gibt keine systematischen Verknüpfungen von Rad- und ÖPNV-Angeboten. In den meisten Städten gibt es vielerorts nicht genug Fahrradstellplätze, was es Nutzern von guten Rädern weiterhin unbequem macht, ihre Räder sicher abzustellen. Besondere Stellplätze für Lastenräder und Räder mit Anhänger gibt es sehr selten. Mitnahmemöglichkeiten für große Räder im ÖPNV bleiben weiterhin nahezu inexistent. Straßenque-

rungen bleiben, wie heute, nicht darauf ausgelegt, dass lange Räder (mit Anhänger, Lastenräder) auch darauf passen. Fahrradwege sind nicht sicher genug, um Kinder darauf fahren zu lassen. Viele Orte auf dem Land bleiben schlecht erschlossen mit dem ÖPNV, sodass Autofahren erhebliche Fahrtzeitverkürzungen bringt. Das Fortbestehen des Dienstwagenprivilegs und der Pendlerpauschale unterstützen und fördern lange Pendelwege.

Dies führt dazu, dass nur besonders ambitionierte Menschen in allen Lebens- und Wetterlagen radfahren; die meisten schaffen sich spätestens mit der Berufstätigkeit oder dem ersten eigenen Kind ein Auto an.

*Umbau der Nahverkehrsinfrastruktur (Stärkung von ÖPNV und Fahrrad) vor allem in Städten*

Die Politik geht die einfacheren Umbaupunkte an: in den Städten, in denen heute schon größere Fahrradaffinität zu beobachten ist (z.B. Freiburg, Münster, Berlin, Kiel; oft Universitätsstädte) wird der Ausbau des Radverkehrs, vor allem mit besonderen Förderungen, vorangetrieben. Dort werden Auto-Parkflächen reduziert und für öffentlichen Verkehr und Radspuren frei. Vorfahrtsregelungen werden dort angepasst; damit werden Erfahrungen gesammelt. Kommunikationskampagnen und Prozessbegleitung von Flächenumverteilungen wird systematisiert.

*Aktiver Umbau der Nahverkehrsinfrastruktur (Stärkung von ÖPNV und Fahrrad) in Stadt und Land*

Bei dem hier diskutierten Entscheidungspunkt könnten flächendeckend min. 2,5m breite Radwege gebaut werden, die auch ein Überholen problemlos erlauben (ADFC 2010). Damit können schnelle Radfahrer und solche mit besonderen Bedürfnissen (Mobilitätseingeschränkte mit Liegerädern, Menschen mit Kindern, Menschen mit Lastenrädern und Lasten, Alte, Junge) alle Radwege gleichermaßen nutzen. Parallel dazu werden Fahrradschnellstraßen insbesondere auf Pendelstrecken etabliert. Benötigte Verhaltensänderungen werden zusätzlich durch Kampagnen, Verkehrsbildung und Öffentlichkeitsarbeit unterstützt.

Flächen werden durch Reduktion des öffentlichen Parkraums frei, zum Beispiel durch jährliche Reduktion von kleinen einstelligen Prozenten. Grundlage für die baulichen Änderungen ist die Anpassung des Straßen- und des Straßenverkehrsrechts, was nach der Anpassung die Vorteile des Umweltverbunds mit in den Fokus der Straßenplanung rückt.

Insbesondere würde dann bei der Stadtplanung in Städten und auf dem Land auf kompakte Siedlungen und Nahversorgung (z.B. mit Grünflächen, Einkaufsgelegenheiten, Ärzten, Kulturangeboten) geachtet, sowie Nähe zu komfortablen, Low-Emission-Mobilitätsknoten sichergestellt. Es werden keine neuen Siedlungsflächen ausgewiesen; manche Siedlungen werden langfristig aufgegeben.

Dieses Szenario erfordert auch auf staatlicher Seite eine Verhaltensänderung. Statt Straßen und Autoverkehr fördern sie Mobilitätsformen ohne negative Externalitäten wie zu Fuß gehen, Radfahren sowie die Nahversorgung. Die notwendige Umverteilung von Flächen könnte, kommunikativ unbegleitet, zu Konflikten führen, insbesondere zu Beginn. Um Maßnahmen kommunikativ zu begleiten, könnten intern oder extern mehr Prozessbegleiter und Kommunikatoren beschäftigt werden. Später sind neue Routinen und Gewöhnungseffekte zu erwarten.

## **Gegenüberstellung der Ausgestaltungsmöglichkeiten**

Von einem Business-as-usual-Ansatz sind keine ausreichenden Klimaschutzeffekte zu erwarten. Großer Vorteil für politische Akteure ist es, dass eine Fortführung des Status Quo weniger Konflikte birgt, als ein Umbau. Eine systematische Förderung von Nahverkehr, Nahversorgung und Radmobilität nur an manchen Orten kann nur zu inselartigen Ergebnissen führen; ausreichende Klimaeffekte sind auch hier nicht zu erwarten. Allerdings bietet der zweite Ansatz das Potential, Erfahrungen zu sammeln. Jedoch gab und gibt es durchaus schon Erfahrungen mit Projekten, die Nahmobilität fördern; ein weiterer „Test-Schritt“ scheint weder notwendig noch zielführend. Außerdem kann argumentiert werden, dass die Bedingungen an weniger nahmobilitätsaffinen Orten andere sind, als an solchen, an denen solche Projekte leicht umzusetzen sind und auch andere Herangehensweisen benötigen; die Erfahrungen also gar nicht übertragbar wären.

Eine systematische Förderung von ÖPNV, Radverkehrsanlagen und Nahversorgung in Stadt und Land, sowie Verknüpfung mittels Low-Emission-Verkehrsknotenpunkten scheint aus Klimaschutzsicht am vielversprechendsten. Da dies größere Umstellungen erfordern würde, könnte ein schrittweises, experimentelles Vorgehen gewählt werden, bei dem Strategien bei Konflikten gegebenenfalls angepasst werden könnten.

Um das motorisierte Verkehrsaufkommen zu reduzieren, muss es der Bevölkerung möglich sein, emissionsarme Technologien bequem zu nutzen und täglich benötigte Waren und Dienstleistungen auf

kurzen Wegen zu erreichen. Die Pfadentscheidung liegt hier in der Frage der Geldverteilung durch die Politik: Wird Geld in gute Stadtplanung, Experimente und Umbau der Städte gesteckt, um die Bedingungen für aktiven Verkehr attraktiv zu machen? Werden auf verschiedenen Ebenen Entscheidungen getroffen, die eine lokale Versorgung begünstigen, wie z.B. hohe Benzin- und Kerosinsteuern oder Emissionshandel, bzw. Reduktion von Werbung, um die Weckung von Konsumwünschen zu dämpfen? Werden die bestehenden Gesetze geändert, die oft Autoverkehr bevorzugen, zugunsten von Radverkehr und Fußgängern? Zieht die Regierung in Betracht, Kompetenzen zwischen föderalen Ebenen neu zu verteilen, um Nahmobilität sicher und entspannt zu machen? Dies ist eine schwierige Frage, da zum Teil Macht zwischen politischen Ebenen und gesellschaftlichen Akteuren umverteilt werden müsste, und viele Akteure involviert sind. Um Fahrrad und Fußverkehr als umweltfreundlichen Verkehrsmitteln deutlich mehr Raum zu geben und entsprechend den Stellenwert zu verändern, den die Gesellschaft Fahrrad- und Fußweginfrastruktur einräumt, müsste die Politik Straßenraum und Privilegien, die bislang dem privaten Auto zugesprochen sind, nun anderen Verkehrsmitteln wie Fußgängern, Fahrrad, Longboards, Elektrorädern, Lastenrädern und ÖPNV mit Fahrradmitnahme zusprechen. Beispielsweise kann der kostenlose öffentliche Parkraum sukzessive jährlich um einen kleinen Prozentsatz (Garthwaite 2011) reduziert werden; damit werden langsam Flächen für andere Nutzungen frei. Dies kann durchaus als alternativ zur Erforschung von Verkehrstechnologien wie Elektroautos gesehen werden. Elektroautos erfordern zwar weniger Umstellung, setzen aber Probleme wie Bewegungsmangel, Stau, Gefahr in Städten für Kinder und andere schwächere Verkehrsteilnehmer, enormen Platzverbrauch durch private Pkw und Ungleichbehandlung der Verkehrsteilnehmer fort. Ansatzpunkte für Veränderungen bieten sich auf verschiedenen Governance-Ebenen: Entscheidungen der (Rad-)Verkehrspolitik werden lokal in Bezirksverordneten-versammlungen bzw. kommunal in Landratsämtern getroffen. Je nach Bundesland gibt es einheitliche Stellplatzverordnungen für Auto- und Fahrradstellplätze bei Neubauten. Auf Bundesebene wird der Bundesverkehrswegeplan entwickelt, sowie die Ausstattung des Straßenbau-Etats. Mobilitätsbedarfe hängen sehr stark von den umgebenden Angeboten und Infrastrukturen ab. Die Politik kann daher entscheiden, die Stadtplanung konsequent auf Nahmobilität auszurichten.

## **Stakeholder-Positionen**

### **Umweltverbände und Zivilgesellschaft**

Akteure wie der Allgemeine Deutsche Fahrradclub (ADFC 2017) und der Verkehrsclub Deutschland (VCD Verkehrsclub e.V. 2015b), befürworten ein Szenario starker Ausrichtung auf aktive Nahmobilität. Auch Umweltverbände wie der BUND (Bund für Umwelt und Naturschutz Deutschland e.V.) oder NABU (NABU 2017) fordern eine stärkere Berücksichtigung von suffizienten Fortbewegungsformen in der Verkehrspolitik. Initiativen wie der Radentscheid Berlin oder Greencity (GreenCity 2018) in München setzen sich aktiv für eine Umgestaltung der Stadt ein. Vorbereitungen zu ähnlichen weiteren Initiativen gibt es in Aachen, Bamberg, Darmstadt, Frankfurt, Hamburg, München und Stuttgart und weiteren Städten (Changing Cities e.V. 2018b).

### **Unternehmen**

Es gibt wenig laute unternehmerischen Stimmen für eine stärkere Ausrichtung der Politik auf Nahmobilität, da die Profiteure zum Teil lokaler Handel, lokale Fahrradwerkstätten, Mieter und Vermieter von weniger lärmbelasteten Immobilien, neuartige Mobilitätsdienstleister und ähnliche wären, die nicht mit einer Stimme sprechen. Der Verband der Verkehrsunternehmer (VDV) spricht sich für konsequente Umstellung auf Öffentlichen Verkehr und Schienenverkehr aus, zum Beispiel durch Parkraumbewirtschaftung, gesicherte dauerhafte Finanzierung, Rechtssicherheit bezüglich neuer technischer Entwicklungen (Verband Deutscher Verkehrsunternehmen VDV o.D.). Automobilhersteller schweigen zu Nahmobilitätsstadtplanung und sprechen sich vor allem für Effizienz in der Lieferkette aus (VDA 2017).

### **Politik**

In der Politik ist niemand zentral zuständig. Straßen werden von verschiedenen föderalen Ebenen gebaut. Bundesstraßen werden auf Bundesebene beschlossen und finanziert, Landesstraßen auf Landesebene, kommunale Straßen von den Kommunen. (Räumlich können diese Straßen jedoch nah beieinander liegen.) Auch der ÖPNV wird gemischt von verschiedenen föderalen Ebenen finanziert (Randelhoff 2013). Raumplanung passiert auch jeweils auf allen föderalen Ebenen (Bundes-, Landes-, Gemeindeebene), wobei die höheren Ebenen die Belange der niedrigeren Ebenen zu berücksichtigen haben. Entsprechend lassen sich keine Positionen aus der Politik finden, die alle Orte betreffen würden; dies betrifft vielmehr alle politischen Institutionen.

Auf Bundesebene stehen sich BMVI, und das Umweltbundesamt (UBA) gegenüber. Das BMVI geht gemäß einem „predict-and-provide“-Ansatz davon aus, dass der Verkehr zwangsläufig immer steigt (Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur 2018b), und dass dafür Infrastruktur zu bauen sei. Kritiker haben argumentiert, dass dieses Vorgehen nicht sinnvoll sei, da ein Angebot an Straßen auch Nachfrage schaffe (Goulden et. al 2014). Das BMVI erarbeitet jedenfalls etwa alle 10 Jahre einen Bundesverkehrswegeplan (BVWP), der für die Bundesstraßen zuständig ist (Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur 2016b). Bezüglich des letzten BVWP kritisiert das UBA, dass der BVWP 2030 die Klimaschutzziele verfehle, zu wenig Mittel in emissionsarme Verkehrsträger gehen, und 11 der 12 im eigenen Umweltbericht genannten Ziele verfehle (Umweltbundesamt 2016). Trotzdem gibt es einige kleinere Projekte und Ansätze auch von Seiten des BMVI, um den Radverkehr zu fördern (Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur 2018a). Die vom BMVI ausgelobten 25 Mio Euro für Radschnellwege sind für ganz Deutschland allerdings eine sehr niedrige Summe und stehen in keinem Verhältnis zu den Ausgaben für Pkw-Strecken.

Das Land Hessen hat für alle Landesbediensteten ein Nahverkehrsticket eingeführt (Hessisches Ministerium des Innern und Sport 2017). In Nordrhein-Westfalen wird die Verknüpfung von Verkehrsträgern mittels Mobilitätsmanagement vorangetrieben (Monheim et. al 2016). Das Land Berlin setzt sich zum Beispiel nun verstärkt mit Radverkehrsförderung auseinander, nachdem der Volksentscheid Fahrrad (jetzt: Changing Cities e.V.) (Changing Cities 2018a) einen 10-Punkteplan entwickelt und 100.000+ Unterschriften gesammelt hat. Nach dem letzten Regierungswechsel ist darauf hin von der Rot-rot-grünen Landesregierung ein „Mobilitätsgesetz“ entwickelt worden, das Berlin zur Fahrradhauptstadt umbauen soll (Senatsverwaltung für Umwelt, Verkehr und Klimaschutz 2018). Die Positionen in den Städten und Gemeinden zu umreißen ist an dieser Stelle nicht möglich, da die Ansätze sehr heterogen sind.

### 3.3.5. Verkehrsvermeidung und -verlagerung auf langen Strecken

#### Fragestellung/Problemaufriss

Der Langstreckenverkehr stellt in der Dekarbonisierung des Verkehrssystems eine besondere Herausforderung dar. Zum einen sind hier in starkem Maße Güterverkehre betroffen. Weit stärker noch als der Personenverkehr hat der Güterverkehr in den vergangenen Jahrzehnten zugenommen und macht etwa ein Drittel der Gesamtemissionen im Verkehrssektor aus (Statistisches Bundesamt 2017). Dabei entfallen auf den Straßengüterverkehr ein Anteil von rund 70 Prozent, Schienenverkehr 16 Prozent und die Binnenschifffahrt 11 Prozent (NABU e.V. 2017). Doch auch der Personenverkehr trägt einen signifikanten Anteil am Verkehrsaufkommen auf langen Strecken. Im Flugverkehr sind dabei Personenverkehr und Güterverkehr eng verknüpft: ca. 50% der Güter werden im Bauch von Personenflugzeugen transportiert (Bundesverband der Deutschen Luftverkehrswirtschaft e.V. 2017). Aktuell werden gewichtsmäßig ca. 3% der Exporte und 1% der Importe von und nach Übersee per Luftfracht transportiert; der monetäre Wert liegt dabei bei ca. 30%. Transportiert werden insbesondere zeitsensible, schnell verderbliche und teure Güter.

Emissionsfreie Transportmöglichkeiten gibt es bisher auf der Langstrecke nicht in ausreichendem Maße. Im Güterverkehr sind ausgerechnet Transporte mit den vergleichsweise emissionsärmeren Verkehrsmitteln Schiff und Schienenverkehr rückläufig, während es in der Luft und auf der Straße einen hohen Zuwachs der Beförderungsleistung gab (Fischedick et. al 2017).

Der Entscheidungspunkt in diesem Bereich liegt darin, wie stark die Nutzung von Fahrzeugen im Personen- und Güterverkehr durch Maßnahmen der Verkehrsverlagerung und -vermeidung reduziert wird.

Tabelle 22: Übersicht über Möglichkeiten der Verkehrsvermeidung und – verlagerung auf langen Strecken (Quelle: Eigene Darstellung)

Möglichkeit	Beschreibung	Pro	Contra
Personen- und Güter-LKW verkehr auf der Langstrecke steigt weiter an	Gütertransporte auf der Langstrecke nehmen weiter zu Fernreisen (privat und geschäftlich nehmen	Keine Gesetzesänderungen oder starken Eingriffe des Staates notwendig Hohe Akzeptanz,	Hohe Kosten für weiteren Ausbau des Straßennetzes Lärm, Luftverschmutzung

		weiter zu zu) Motorisierter Individualverkehr bleibt konstant Aktuelle Konsummuster bleiben erhalten	keine Eingriffe in Konsummuster	-Staus, erhöhte Unfallgefahr Keine Anreize für Förderung von emissionsärmeren Fortbewegungsmitteln
Moderate Verkehrsvermeidung und verlagerung	Verkehrsverlagerung	Anreize für Verlagerung von Gütertransporten auf Schiene und Schiff Infrastrukturausbau beibehalten Schiene und Wasserstraßen Angebotsverbesserung bei Bahnreisen und Gütertransporten auf der Schiene Stärkung lokaler Produktion Virtuelle Lösungen	Moderater Beitrag zur Dekarbonisierung Moderater Beitrag zu nachhaltigeren Lebensstilen Stärkung lokaler Wertschöpfungsketten Nur moderate Wachstum des Verkehrs: Unfallrisiken werden reduziert	Hohe Kosten für weiteren Ausbau des Straßennetzes bei gleichzeitigem Ausbau von Wasserstraßen und Schienen Bei niedriger Akzeptanz Umsetzung durch „weiche“ Maßnahmen Schwierig Moderate Veränderung der Lebensstile notwendig
Maximale Verkehrsvermeidung, starke Verkehrsvermeidung	Verkehrsvermeidung, starke Verkehrsvermeidung	Verkehrsvermeidung durch Änderung von Konsummustern Maximale Verkehrsverlagerung auf emissionsärmere Verkehrsträger Verbot von Kurzstreckenflügen und Bau neuer Flughäfen Aufhebung steuerlicher Vergünstigungen Evt: Werbung, um Nachfrage zu verlangsamen	Kosteneinsparung für Ausbau der Straßeninfrastruktur Deutlicher Beitrag zu Dekarbonisierung sowie weiteren Nachhaltigkeitszielen Stärkung lokaler Wertschöpfungsketten Stärkung lokaler Beziehungsnetzwerke Reduktion des Verkehrs auf den Straßen, weniger Unfälle Weniger Lärm durch LKW und Flugzeuge	Starke Veränderung von Lebensstilen Gewinneinbußen bei Luftfahrtunternehmen, Fluggesellschaften, Flughafenbetreibern, Logistikunternehmen, Fahrzeugherstellern Umsetzung kann leicht als Rückschritt und Bevormundung empfunden werden Gesetzesänderungen schwierig

### Unsicherheiten und externe Treiber

Entwicklung globaler vs. lokaler Märkte  
Politische Entwicklungen in den Nachbarländern  
Erfolg von Infrastrukturausbau (digital, Schiene)

### Wechselwirkungen mit anderen Richtungsentscheidungen

Strategien/Pläne und Gerichtsurteile zur Luftreinhaltung  
Globale, EU-weite und nationale Regulierungen, z.B. CO<sub>2</sub>-Zielwerte, Richtlinie zum Aufbau alternativer Energieversorgungs-Infrastrukturen, Energiesteuern  
Steuerung und Entwicklung von Konsummustern (national und international)

### Beschreibung der Ausgestaltungsmöglichkeiten

*Straßenverkehr stagniert, stark ansteigender Güter- und Flugverkehr*

Moderne Konsummuster und –verhalten sowie, eng damit verknüpft, Preissignale und der ordnungspolitische Rahmen begünstigen momentan einen weiteren Zuwachs des Langstreckenverkehrs. So ist es gesellschaftlich akzeptiert, Waren wie Lebensmittel, unabhängig von der Jahreszeit, aus weit entfernten Ländern zu beziehen. Auch private und dienstliche Reisen ins Ausland sind üblich, Nachhaltigkeitsaspekte spielen bei der Wahl des Reiseziels noch eine untergeordnete Rolle. Die breite Masse der Menschen in Deutschland hat sich vielmehr an günstiges Fliegen und weite Fahrten mit dem Auto gewöhnt. Geschäftsreisen mit dem Flugzeug ins In- und Ausland sind Teil der modernen Arbeitswelt. Sowohl Privat- als auch Geschäftsreisende verstehen Fernreisen als zentralen Aspekt von Leben und individueller Freiheit.

Werden diese Konsummuster und –verhalten nicht durch den Einsatz verschiedener Maßnahmen wie Preissignalen verändert, ist in dieser Ausgestaltungsvariante damit zu rechnen, dass sich der aktuelle Trend des zunehmenden Verkehrs auf der langen Strecke durch steigenden Güter- und Flugverkehr fortsetzt, der motorisierte Individualverkehr bleibt in etwa konstant (Blanck und Zimmer 2016). Emissionsminderungen werden in dieser Variante v.a. durch technologische Veränderungen erzielt, wie beispielsweise LKW-Verkehr mit Oberleitungen oder den Einsatz von Biokraftstoffen im Flugverkehr (siehe oben). Andere Probleme des Verkehrssektors wie Ineffizienz, Stau, hoher Ressourcenimport aus anderen Ländern und damit die Externalisierung von Umweltproblemen sowie immer weiter steigende Infrastrukturbedarfe bleiben unberührt.

#### *Moderate Verkehrsvermeidung und Verkehrsverlagerung im Personen- und Güterverkehr*

Die zweite Ausgestaltungsmöglichkeit beinhaltet verschiedene Maßnahmen, um eine moderate Verlagerung sowie Vermeidung von Verkehren zu erreichen. Zunächst gilt es Anreize zu setzen, Fernreisen von Flugzeugen und PKW auf die emissionsärmeren Verkehrsträger Schiene und Wasserstraßen zu verlagern. Dafür muss die Nutzung dieser emissionsarmen Verkehrsmittel attraktiver werden. Dies stellt Anforderungen an die Infrastruktur. So müssen beispielsweise bei der Infrastrukturplanung der Erhalt und Ausbau von Schienen- und Wasserstraßen im Vordergrund stehen, was deutliche Investitionen beinhaltet. Diese könnten in der Straßeninfrastruktur frei werden, wo der Fokus auf Erhalt und nicht auf Ausbau liegen muss (Rudolph et. al 2017). Zudem gilt es, das Angebot an emissionsarmen Alternativen zu optimieren. Für den Ferien- und Geschäftsverkehr muss das Angebot der Bahn attraktiv gemacht werden, beispielsweise indem innerhalb Europas Nachtzüge wieder ausgebaut werden (Bundesverband Grüne Liga e.V. 2017; Holstein 2017; Nachtgiger 2016; Wilken 2017). Um auch die Attraktivität für den Güterverkehr zu steigern, muss die Netzbewirtschaftung optimiert werden, Züge müssten Waren und Personen schneller auf der langen Strecke transportieren können. Durch Maßnahmen wie die Erhöhung der LKW Maut müsste die Schiene gegenüber dem LKW für den Gütertransport auf der Langstrecke zudem deutlich kostengünstiger gestaltet werden. Beim Ausbau von Flughäfen müsste wiederum auf staatliche Unterstützung verzichtet werden.

Um Personen- und Güterverkehr auf der langen Strecke zu vermeiden, müssten Konsummuster verändert werden. Lokale, regionale Produktionsprozesse müssten gestärkt werden, indem mehr Transparenz im Hinblick auf die Umweltauswirkungen von Herstellung und Transport von Produkten geschaffen wird und finanzielle Anreize für die Versorgung mit regionalen Waren gesetzt werden (Blanck und Zimmer 2016). Geschäftsfernreisen per Flugzeug und PKW müssten durch mehr virtuelle Treffen ersetzt werden. Dafür müsste für Firmen größere Transparenz über die Emissionen und Umweltauswirkungen einzelner Flug- und PKW-Reisen geschaffen werden um hier ein größeres Bewusstsein zu schaffen. Um virtuelle Treffen attraktiver zu machen, könnte der Aufbau einer entsprechend notwendigen digitalen Infrastruktur über staatliche Anreize vergünstigt und vereinfacht werden. Durch Besteuerung von Kerosin für nationale Flüge würden sich die Flugpreise erhöhen. Dies würde externe Kosten internalisieren, der Preis läge näher an der „ökologischen Wahrheit“ (Schwarzer 2014: VCD Verkehrsclub e.V. 2017). Dies würde den Anreiz zu fliegen reduzieren. Darüber hinaus könnten private Fernreisen durch öffentliche Kampagnen zu den Umweltkosten des Fliegens sowie vermehrtes Marketing von Ländern und Kommunen für die Naherholung reduziert werden.

#### *Starke Verkehrsvermeidung und -verlagerung im Personen- und Güterverkehr*

Die dritte Ausgestaltungsmöglichkeit beinhaltet eine maximale Verlagerung von Langstrecken-Verkehren auf begrenzt verfügbare emissionsärmere Alternativen sowie eine deutliche Vermeidung von Personen-, Güter- und Flugverkehr. Der Gesetzgeber müsste in dieser Variante durch verschiedene Maßnahmen stark in das Marktgeschehen und in die Lebensweisen der Menschen eingreifen, um die Rahmenbedingungen für Langstreckenverkehr so zu verändern, dass Langstreckenverkehr grundsätzlich unattraktiver und in Teilen eingestellt wird.

Um Marktsignale für die Vermeidung von Flugverkehr zu stärken, würde die Politik steuerliche Vergünstigungen für Flughäfen und Kerosin abschaffen und hier CO<sub>2</sub>-Besteuerung einführen. Nachtflugverbote müssten flächendeckend durchgesetzt und ausgeweitet werden, Kurzstreckenflüge eingestellt werden (Blanck et. al 2017). Durch diese Maßnahmen würde die Politik den Neu- oder Ausbau von Flughäfen verhindern. Die Folge wären Gewinneinbußen für Luftfahrtunternehmen, Fluggesellschaften und Flughafenbetreiber.

Auch Kraftstoffe müssten so besteuert werden, dass PKW-Fernreisen und LKW-Gütertransporte auf der Langstrecke unattraktiv werden und der Umstieg auf die Schiene oder die Vermeidung von Reisen und Transporten attraktiv wird. Externalisierte Kosten durch Emissionen und Lärm auf Langstrecken-transporten müssten insgesamt internalisiert werden, damit die Preise die Produktionskosten besser abbilden. Dies könnte ebenfalls durch eine CO<sub>2</sub> Steuer geschehen.

Um zusätzliche Anreize für die Veränderung von Konsummustern im Langstreckenverkehr zu bewirken, müsste die Politik Werbung für nicht-nachhaltige Produkte und Lebensweisen beschränken. Denn sie schafft Konsumwünsche, die Fernreisen mit Flügen oder Produkte aus anderen Ländern umfassen. Beispielsweise wäre Produktwerbung nur noch am Ort der Leistung (an Läden oder Gaststätten) zulässig, um lokale Produktion in den Vordergrund zu rücken und zu stärken (Changing Cities e.V. 2018c). Denkbar wäre, dass an öffentlichen Orten nur positiv gemeinwohlabilanzierte Unternehmen (Internationaler Verein zur Förderung der Gemeinwohl-Ökonomie e.V. 2018) ausstellen dürften.

## **Gegenüberstellung der Ausgestaltungsmöglichkeiten**

Von den drei dargestellten Ausgestaltungsmöglichkeiten der Vermeidung und Verlagerung von Verkehr auf der Langstrecke ermöglicht keine alleine die Dekarbonisierung des Verkehrssektors. Erst in Kombination mit der Umstellung von Verbrennungsmotoren auf alternative Antriebe und die Nutzung erneuerbaren Energieträgern ermöglichen diese, die Klimaschutzziele zu erreichen.

Die beiden Pfade, die moderat oder stark in Märkte und Konsumverhalten eingreifen, könnten aber einen größeren Beitrag zur Reduktion von Emissionen leisten, da sie zu einer Stabilisierung und sogar Reduktion v.a. des Güterverkehrs auf der langen Strecke führen können. Ohne Änderung der Rahmenbedingungen wird der Verkehr hier dem aktuellen Trend folgend weiter steigen.

Die Varianten der moderaten sowie starken Verkehrsvermeidung und –verlagerung haben den Vorteil, dass keine großen Technologie- oder zusätzliche Infrastrukturinvestitionen nötig sind. Vielmehr gilt es, Infrastrukturinvestitionen zu verlagern – weg vom Ausbau von Straßen, hin zum Ausbau der Bahninfrastruktur. Beide Ausgestaltungsmöglichkeiten sind zudem wenig von Erfolgen in Technikinnovationen abhängig. Wirtschaftsakteure wie Flugzeug- und LKW-Hersteller oder Flughafenbetreiber hätten in diesen Varianten jedoch deutliche Gewinneinbußen. Wertschöpfungsketten würden sich v.a. bei starker Lenkung durch die Politik deutlich verändern, beispielsweise durch einen Fokus auf mehr lokale Produktion oder Naherholung statt Fernreisen.

Durch das starke Eingreifen in bestehende Geschäftsmodelle und Konsummuster wären deutliche Anpassungen notwendig, die selbst angesichts der hohen Zustimmung der Bevölkerung zur Energiewende v.a. in Zeiten wachsenden Populismus zu Akzeptanzproblemen führen könnte. Durch eine Veränderung der Wertschöpfungslandschaft wären Proteste von „Verlierern“ dieses Prozesses zu erwarten.

Da auf der Langstrecke internationale Verkehre betroffen sind, können auch die politische Rahmensetzung und wirtschaftliche Entwicklungen in anderen Staaten, in der EU und darüber hinaus eine wichtige Rolle für die verschiedenen Pfade spielen. Flugbeschränkungen an deutschen Flughäfen könnten beispielsweise zur vermehrten Nutzung von Flughäfen in Grenzgebieten der Nachbarländer Deutschlands führen. Bei der Vermeidung von Langstreckenreisen zu Geschäftszwecken spielt letztlich auch das Fortschreiten der Digitalisierung und auch Ausbau und Verbesserung digitaler Infrastrukturen in Deutschland, insbesondere in ländlichen Gegenden eine wichtige Rolle.

Insbesondere bei der Einführung von Verboten und ordnungspolitischen Eingriffen, wie in den Varianten mit starker Vermeidung und Verlagerung des Verkehrs, sind Gesetzesänderungen notwendig. Diese setzen auf politischer Seite einen breiten Konsens und Handlungswillen voraus. Beides wird, auch angesichts der von den Entscheidungen betroffenen Wirtschaftsakteure, schwierig zu erreichen sein.

## Stakeholder-Positionen

Aktuelle Diskussionen um Langstreckenverkehre bewegen sich zwischen zwei Extremen: Politik und Wirtschaft gehen bereits grundsätzlich davon aus, dass das Verkehrsaufkommen auf der Langstrecke erhöhen wird und konzentrieren sich auf Maßnahmen, wie die Emissionen angesichts dessen zumindest stabilisiert werden können. Zivilgesellschaft und angewandte Forschung hingegen fokussieren eben auch Strategien zur Vermeidung von Verkehr bzw. dessen Verlagerung auf emissionsärmere Verkehrsträger. Dabei stehen diese Positionen v.a. dort im Konflikt, wo unterschiedliche Ansichten über Maßnahmen zur Erreichung der Klimaziele bestehen.

### Zivilgesellschaft und Forschung

Zivilgesellschaftlichen Organisationen, die den Flugverkehr als massive Quelle von Emissionen identifizieren, drängen auf die Vermeidung von Flugverkehr um Flugverkehr umweltverträglicher zu machen, neben Emissionsminderungen also beispielsweise Lärm zu reduzieren (Reh et. al 2015). In besonderem Maße kritisieren sie zudem das UN-basierte Instrument „Carbon Offsetting and Reduction Scheme for International Aviation“ (CORSIA), das ab 2021 Emissionszuwächse im Flugverkehr mit Minderungen in anderen Sektoren kompensieren soll. Mit dem Instrument CORSIA, so die Kritik der NGOs, werden Emissionen im Flugverkehr weiter steigen und überdies die Kompensationsprojekte nicht auf ihre Sozialverträglichkeit geprüft werden. Um den Klimawandel zu verhindern, müssten sofort Emissionen im Flugverkehr reduziert werden. Auch kritisieren sie gravierende Bemessungsschwierigkeiten für Emissionsminderungen bei den Ausgleichsprojekten. Eine Vermeidung von Flugverkehr, so die Forderung, soll daher Emissionen in der Luftfahrt senken (Germanwatch e.V. 2016; Ecklundt 2016). Greenpeace konzentriert sich beispielsweise darauf, den Flugverkehr zu reduzieren, indem Transporte auf die Schiene verlagert werden (Rudolph et. al 2017). Der BUND betont die wichtige Rolle der Politik, um zu verhindern, dass er Langstrecken- bzw. Güterverkehr weiter ansteigt (Bund für Umwelt und Naturschutz Deutschland 2017).

In der angewandten Forschung werden für die Langstrecke zurzeit v.a. Lösungen wie Effizienzsteigerung, alternative Antriebe und Verkehrsverlagerung diskutiert, weniger aber Verkehrsvermeidung auf der Langstrecke (siehe Punkt 1: Verkehrstechnologie) (Arnhold et. al 2016; Kempf 2017; Verband der Automobilindustrie 2016).

### Unternehmen und Unternehmensverbände

Auf Unternehmensseite werden naturgemäß keine Optionen zur Minderung oder Verlagerung von Verkehr diskutiert. Der Bundesverband der deutschen Luftverkehrswirtschaft (BDL) erwartet grundsätzlich eine weitere jährliche Steigerung des Flugverkehrs um 5%. Da selbst bei Effizienzsteigerungen in der Luftfahrt mit einem weiteren Wachstum von Emissionen statt der benötigten Reduktion zu rechnen ist, begrüßen sie grundsätzlich die Einigung auf CORSIA. Zudem arbeitet die Luftfahrt an weiteren Effizienzsteigerungen von Flugzeugen sowie dem Einsatz alternativer Antriebe (BDL 2017) (siehe hierzu Punkt 1: Verkehrstechnologie). Auch unter Automobilherstellern und –zulieferern wird für die Langstrecke nicht an Strategien zur Vermeidung und Verlagerung von Verkehr gearbeitet, sondern an Lösungen wie Effizienzsteigerung oder alternativen Antrieben für LKWs (siehe Punkt 1: Verkehrstechnologie). Der Verband der Bahnindustrie wiederum weist auf die Notwendigkeit von Infrastrukturinvestitionen hin, um Verkehrsverlagerung auf die Schiene zu ermöglichen sowie die Verbesserung der Wettbewerbsfähigkeit von Bahnfahrten, beispielsweise durch die Abschaffung der umfassenden Schienenmaut (Die Bahnindustrie 2016). Die Schifffahrtsindustrie verweist auf politische Missstände, die eine Verlagerung des Personen- und Güterverkehrs weg von der Straße verhindern. Der Bundesverband Öffentlicher Binnenhäfen sieht in der Binnenschifffahrt eine wichtige Komponente nachhaltiger Verkehrsplanung und fordert von der Politik, in ihrer Förderung nicht nur Straße und Schiene zu berücksichtigen (Bundesverband Öffentlicher Binnenhäfen e.V. 2017). Der Bundesverband der Deutschen Schifffahrt fordert darüber hinaus von der Politik wettbewerbsausgleichende Maßnahmen, um zu verhindern, dass Bahn und Schifffahrt in verschärfter Konkurrenz stehen und so der Straßenverkehr weiter zunimmt (Bundesverband der Deutschen Binnenschifffahrt 2017).

### Politik

Die Bundesregierung sieht den weiteren Anstieg des Langstreckenverkehrsaufkommens grundsätzlich als gegeben an (Bundesministerium für Verkehr und Digitale Infrastruktur 2017a). Sie betont dabei v.a. die wirtschaftlichen Aspekte des Flugverkehrs betont und hält sich mit konkreten Vorgaben zurück (Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur 2017b).

In ihrem Klimaschutzplan 2050 setzt sie auf technologische Lösungen, Digitalisierung bzw. Effizienzsteigerung, um den Verkehr auf der langen Strecke zu dekarbonisieren. Dies soll grundsätzlich auch

Verkehr vermeiden, auch wenn dies kein Fokus des Plans ist. Durch Fördermaßnahmen soll auch die Verlagerung von Güterverkehr auf Schiene und Wasserstraßen erfolgen (Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit 2016).

## 3.4 SEKTORÜBERGREIFENDE FRAGESTELLUNGEN

### 3.4.1. Sektorkopplung Elektrifizierung vs. synthetische Brennstoffe

Tabelle 23: Übersicht der grundsätzlichen Ausgestaltungsmöglichkeiten im Bereich Sektorkopplung (Quelle: Eigene Darstellung)

Möglichkeit	Beschreibung	Pro	Contra
Direkte Nutzung von Strom	Strom wird direkt in anderen Sektoren eingesetzt (Wärmepumpen, Elektromobilität, etc.)	keine Umwandlungsverluste	Ggf. geringe Resilienz durch starke Fokussierung (wissenschaftlich kaum untersucht)
Herstellung von synthetischen Brennstoffen	Strom wird genutzt, um synthetische Brennstoffe zu produzieren, die dann wiederum in anderen Sektoren verwendet werden	Nutzung bestehender Infrastruktur (Gasheizungen, Gasnetz, Verbrennungsmotoren)	hohe Umwandlungsverluste, dadurch erheblicher Mehrbedarf an EE-Erzeugungsanlagen
Import von synthetischen Brennstoffen	Synthetische Brennstoffe werden im Ausland auf Basis erneuerbarer Energien erzeugt und importiert	Nutzung bestehender Infrastruktur (Gasheizungen, Gasnetz, Verbrennungsmotoren)	Höhere Importabhängigkeit als in den anderen Entwicklungspfaden ggf. negative Nachhaltigkeitseffekte insofern keine entsprechenden Kriterien für die Produktion im Ausland angelegt werden; hohe Umwandlungsverluste, dadurch erheblicher Mehrbedarf an EE-Erzeugungsanlagen
<b>Unsicherheiten und externe Treiber</b>			
Importpotenziale und Kosten für synthetische Brennstoffe			
Ausbaupotenzial für EE-Erzeugungsanlagen in Deutschland			
Technologieentwicklungen und resultierende Kosten (insbesondere auch Elektrolyseure)			
Effizienzentwicklung der Nachfrage			

<b>Möglichkeit</b>	<b>Beschreibung</b>	<b>Pro</b>	<b>Contra</b>
<b>Wechselwirkungen mit anderen Richtungsentscheidungen</b>			
	Verbrennungsmotor vs. Elektromobilität (hier wirtschaftspolitische Entscheidungen)		
	Akzeptanzentwicklung für Transformation		

## Fragestellung/Problemaufriss

Hinter dem Stichwort „Sektorkopplung“ verbirgt sich das Bestreben, die unterschiedlichen Energieerzeugungs- und Anwendungssektoren stärker energetisch zu verbinden. Relevante Sektoren sind der Strom-, der Verkehrs- und der Wärmesektor. Die Industrie spielt als Energienachfrager sowie Nachfrager nach Grundstoffen eine besondere Rolle. Der Stromsektor ist im Rahmen der Sektorkopplung als Energieerzeugungssektor zentral. Aus ihm wird Energie in Form von Strom für die anderen Sektoren bereitgestellt. Hinter der Absicht einer verstärkten Kopplung der Sektoren können unterschiedliche Ziele stehen:

- Die Nutzung von ansonsten abgeregelter EE-Stromerzeugung

- Die Bereitstellung von Flexibilität für den Stromsektor

- Die Dekarbonisierung der jeweiligen Sektoren durch verstärkte Nutzung von EE-Strom

- Die Reduktion des notwendigen Stromnetzausbaus durch Nutzung der Gasinfrastruktur (siehe Kapitel Konventionelles Erdgas vs. Gasnetz als Langzeitspeicher)

Die möglichen Pfade der Sektorkopplung unterscheiden sich in Abhängigkeit von der Zielstellung die im Fokus steht. Für eine Bewertung der Pfade ist zu analysieren, welcher Nutzen durch die Kopplung der unterschiedlichen Sektoren erzielt werden kann und bei welchem Sektor dieser Nutzen anfällt.

Mit dem Ziel der möglichst vollständigen Nutzung der ansonsten abgeregelten EE-Stromerzeugung erscheint eine möglichst baldige verstärkte Kopplung der Sektoren sinnvoll. So könnten diese EE-Überschüsse in anderen Sektoren genutzt werden, fossile Energieträger verdrängen und CO<sub>2</sub>-Emissionen vermieden werden. Für die Nutzung der EE-Überschüsse stellt sich jedoch die fundamentale Frage, wann mit Überschüssen in welcher Höhe zu rechnen ist. Dabei muss zwischen netzbedingten und marktbedingten Überschüssen unterschieden werden. Netzbedingte Überschüsse (Ausfallarbeit) entstehen, wenn aufgrund von Netzengpässen nach §14 EEG Einspeisemanagement durchgeführt wird und EEG-Erzeugungsanlagen abgeregelt werden. Laut Monitoringbericht der Bundesnetzagentur (BNetzA & Bundeskartellamt, 2017) wurden im Jahr 2016 ca. 3,7 TWh Ausfallarbeit durch das Einspeisemanagement generiert. Über 90% der Ausfallarbeit entstand durch die Abregelung von onshore Windenergieanlagen. Auch räumlich weist die EE-Abregelung eine starke Fokussierung auf. So entstand über 70% der Ausfallarbeit in Schleswig-Holstein. Vor diesem Hintergrund zeigt sich: Netzbedingte Überschüsse entstehen zwar in relevanten Größenordnungen, die Mengen sind jedoch im Vergleich zur Nachfrage in anderen Sektoren nach erneuerbaren Energien marginal. Zudem entstehen die Überschüsse räumlich fokussiert im Norden von Deutschland und auch dort nur an wenigen Netzknotenpunkten. Für die Nutzung dieser Ausfallarbeit müsste die Sektorkopplung auch an diesen Orten stattfinden. Die zukünftige netzbedingte Abregelung ist zudem stark von der Umsetzung des geplanten Netzausbaus abhängig. Von marktbedingten Überschüssen wird gesprochen, wenn auf den Marktplätzen die Erzeugung aus EE-Anlagen (Angebot) die Last (Nachfrage) übersteigt. Dabei ist jedoch zu beachten, dass ab ca. 60% EE-Anteil an der Nachfrage ein relevanter Teil dieser marktbedingten Überschüsse in Energiespeichern eingespeichert werden muss, um eine durchgehende Stromversorgung sicher zu stellen. Zudem können marktbedingte EE-Überschüsse nicht alleinig über einen geringen Marktpreis (z.B. kleiner Null) definiert werden, da Must-Run-Kraftwerke zum Teil erneuerbare Erzeugungseinheiten aus dem System drängen. Für die Zukunft (im Jahr 2050) zeigen unterschiedliche Szenarien marktbedingte Überschüsse zwischen 20 und 80 TWh auf (Sternier, 2014), die nicht im Stromsystem genutzt werden können.

Wie in den vorherigen Kapitel dargestellt, sind die Strombedarfe des Verkehrs- und Wärmesektor bei einer starken Sektorkopplung langfristig deutlich über 100 TWh und liegen in manchen Szenarien bei mehreren hundert TWh (siehe Kapitel „Konstanter Strombedarf vs. stark steigender Strombedarf“). Somit zeigen diese Daten zu netzbedingten und marktbasieren EE-Überschüssen, dass das Potenzial für die Sektorkopplung aus Überschüssen als eingeschränkt einzustufen ist.

Die Kopplung des Stromsektors mit anderen Sektoren kann auch als Bereitstellung von Flexibilität für den Stromsektor interpretiert werden. So wird zum Teil argumentiert, dass durch eine flexible Stromnachfrage von Tauchsiedern oder Elektroautos dem Stromsystem Flexibilität bereitgestellt wird. Dabei ist zu beachten, dass durch diese Technologien zunächst eine zusätzliche Stromnachfrage gedeckt werden muss. Diese Nachfrage muss im Sinne der Klimaschutzziele erneuerbar gedeckt werden. Wird diese Nachfrage durch fluktuierende erneuerbare Energien gedeckt, erhöht sich auch der Flexibilitätsbedarf im Stromsystem.

Das Ziel der „Dekarbonisierung durch Nutzung von EE-Strom in anderen Sektoren“ ist aus Klimaschutzsicht das zentrale Argument für die Sektorkopplung. Dabei zeigt sich, dass insbesondere bei Minderungszielen über 80% (gegenüber 1990) eine verstärkte Nutzung von erneuerbarem Strom in anderen Sektoren notwendig ist. Insbesondere der Verkehrssektor (Flugverkehr und Schiffsverkehr) sowie die Grundstoffversorgung in der Industrie kann ansonsten nicht ausreichend zu der Reduktion der Treibhausgasemissionen beitragen (Öko-Institut & Fraunhofer ISI, 2015a).

Das Ziel „Reduktion des Stromnetzausbaus durch Nutzung der Gasinfrastruktur“ hat insbesondere den momentan mit Akzeptanzproblemen behafteten Stromnetzausbau im Fokus. Dieser mögliche Nutzen der Sektorkopplung ist an den Power-to-Gas Pfad gebunden. Grundsätzlich kann Strom in Wasserstoff und Methan umgewandelt werden, über das Gasnetz transportiert und am Zielort entweder direkt verbraucht oder mittels einer Gasturbine wieder in Strom umgewandelt werden. Die Transportfunktion des Gasnetzes würde in diesem Fall den Energietransport über das Stromnetz substituieren (vergleiche (DVGW, 2015)). Neben diesem direkten Energietransport wird auch ein virtueller Stromtransport diskutiert (DVGW, 2013). Dabei würde im Norden Deutschlands Strom zu Gas umgewandelt werden und im Süden aus Gas Strom erzeugt werden. Detaillierte Szenarien, die diese Substitutionsmöglichkeit des Stromübertragungsnetzes für Deutschland abbilden, sind den Autoren jedoch nicht bekannt.

## **Beschreibung Ausgestaltungsvarianten**

Grundsätzlich wird derzeit eine verstärkte Sektorkopplung entlang von drei Hauptpfaden diskutiert:

Direkte Nutzung von Strom in anderen Sektoren (z.B. Tauchsieder, Wärmepumpen, Elektromobilität)

Herstellung von synthetischen Brennstoffen aus Strom mittels Elektrolyseure zur Nutzung in anderen Sektoren (ggf. auch Herstellung von synthetischen Grundstoffen für die Industrie)

Import von synthetischen Brennstoffen auf Basis von erneuerbaren Energien aus dem Ausland für die Sektoren Industrie, Verkehr und Wärme

Der Pfad der direkten Nutzung von Strom in anderen Sektoren ist kein neuer. Nachspeicherheizungen sind ein Beispiel dafür, dass Strom schon lange in anderen Sektoren (hier Wärmesektor) direkt genutzt wurde. Die Motivation für die direkte Stromnutzung ändert sich jedoch. War es in der Vergangenheit, um beim Beispiel der Nachtspeicherheizungen zu bleiben, die Auslastung der Grundlastkraftwerke in Schwachlaststunden, so geht es in der heutigen Diskussion der Sektorkopplung um die oben im Kapitel genannten Ziele. Heute werden für die direkte Stromnutzung im Wärmesektor insbesondere so genannte Power-to-Heat Anlagen (Tauchsieder) und Wärmepumpen diskutiert. Dabei spielen Tauchsieder insbesondere bei Nah- und Fernwärmenetzen sowie in der Industrie eine Rolle. Im Verkehrssektor ist die batterie-elektrische Mobilität im Fokus. Aber auch weitere Optionen wie Oberleitungs-LKW stellen eine Form der direkt elektrischen Sektorkopplung dar (Öko-Institut & Fraunhofer ISI, 2015a).

Der Pfad der Herstellung und Nutzung von synthetischen Brennstoffen in anderen Sektoren basiert auf der Umwandlung von Strom zu Wasserstoff, Methan oder weiteren stofflichen Folgeprodukten (auch synthetischen Kraftstoffsubstituten) in Deutschland. Bei der Umwandlung entstehen heute energetische Verluste von ca. 30 bis 40% bei der Herstellung von Wasserstoff und weiteren 40% Verlusten bei der Herstellung von Methan (Greenpeace Energy eG, 2015). Wasserstoff kann in geringen Beimischungsmengen in das Erdgasnetz eingespeist werden, Methan ist ein Erdgas-Substitut (Dörr et al., 2016). Die Nutzungspfade sind vielfältig. So kann Wasserstoff in Brennstoffzellen wieder zu Strom umgewandelt werden, oder direkt als Grundstoff in der Industrie verwendet werden. Methan kann beispielsweise in bestehenden Erdgas-Heizungen oder Erdgas-Autos verwendet werden. Bei der Nutzung der Power-to-Gas Technologie sind Standortbedingungen zu erfüllen. Bei einer Expertenbefragung durch die Deutsche Energie Agentur wurden hierbei die Nähe zu Einspeisepunkten erneuerbarer Energien, die Nähe zu regionaler Wasserstoffnutzung sowie die Nähe zu einem Gasverteilnetz mit Wasserstoffaufnahmekapazität genannt (Deutsche Energie-Agentur GmbH (dena) 2016b). Soll eine Methanisierung stattfinden, wurde als Standortfaktor ebenso die Nähe zu CO<sub>2</sub>-Quellen genannt. Für einen Beitrag zur Dekarbonisierung ist es dabei notwendig, dass erneuerbare CO<sub>2</sub>-Quellen genutzt werden. So können beispielsweise Biomasse- oder Biogaskraftwerke zur Bereitstellung von CO<sub>2</sub> herangezogen werden.

Synthetische Brennstoffe können auch im Ausland hergestellt und für die Nutzung in Deutschland importiert werden (Agora Verkehrswende & Agora Energiewende, 2018). Dieser Pfad verlagert die Umwandlung von Strom in synthetische Brennstoffe in das Ausland und nutzt insbesondere Kostenvor-

teile durch Standorte mit geographisch bedingten hohen Volllaststunden für erneuerbare Stromerzeugungstechnologien.

## Gegenüberstellung Ausgestaltungsvarianten

Bei der Analyse der Sektorkopplungspfade sind folgende Aspekte von besonderer Bedeutung. Beitrag zur CO<sub>2</sub>-Vermeidung (Welcher Brennstoff wird durch Sektorkopplung ersetzt?): Im Rahmen der Sektorkopplung sollten CO<sub>2</sub>-arme Energien zunächst dort eingesetzt werden, wo der Beitrag zur CO<sub>2</sub>-Vermeidung am höchsten ist. Ersetzt zum Beispiel Strom aus erneuerbaren Energien den Brennstoff Öl, so werden mehr CO<sub>2</sub>-Emissionen eingespart als wenn Erdgas substituiert wird (unter Annahme eines konstanten Nutzenoutputs). Gegenläufig könnten jedoch auch Zahlungsbereitschaften einzelner Sektoren für erneuerbare Energie die Nutzungshierarchie prägen. Zudem spielen Umwandlungsverluste eine zentrale Rolle. Grundsätzlich sollte erneuerbarer Strom zunächst direkt verbraucht werden, dann Grundstoffe in der Industrie ersetzt (z.B. Wasserstoff) und darauf folgend synthetische Brennstoffe produziert werden.

Notwendige Investitionen in Infrastruktur: Bei der Nutzung von Sektorkopplungsmöglichkeiten müssen Investitionen in bestehende oder neue Technologien getätigt werden. Beispiele sind Windenergieanlagen, Übertragungsnetze, Speicher oder Elektrolyseanlagen.

Flächenverbrauch durch Infrastruktur: Infrastrukturen beanspruchen in unterschiedlichem Ausmaß Flächen. Insbesondere Windenergieanlagen und Übertragungsnetztrassen haben Auswirkungen auf die Fläche. Für eine Sektorkopplung, die maßgeblich auf eine verstärkte Nutzung von EE-Strom basiert, stellt sich die Frage, ob entsprechende Flächenpotenziale für die notwendigen zusätzlichen EE-Erzeugungsanlagen verfügbar sind.

Notwendiger Ausbau an konfliktbehafteter Infrastruktur (EE-Erzeugungsanlagen, Netze, etc.): Die hier skizzierten unterschiedlichen Sektorkopplungspfade wirken sich auch auf die Akzeptanz der notwendigen Infrastrukturen aus.

Import-Abhängigkeit: Durch den Import von beispielsweise synthetischen Brennstoffen entstehen Importabhängigkeiten die sich auf die Verfügbarkeit aber auch auf die variablen Kosten der Energiebereitstellung auswirken können.

Resultierende Resilienz des Energiesystems: Unter dem Aspekt der Resilienz fällt insbesondere die Störanfälligkeit des Energiesystems.

Mit Blick auf den Beitrag zur CO<sub>2</sub>-Vermeidung sowie der notwendigen Infrastruktur (EE-Anlagen und Netzausbau), ist die Effizienz der unterschiedlichen Sektorkopplungstechnologien in den einzelnen Sektoren zu berücksichtigen. Zur Deckung der Nachfrage zeigen sich insbesondere bei der Nutzung von synthetischen Brennstoffen hohe Umwandlungsverluste. Diese führen zu einem erhöhten Ausbaubedarf an EE-Erzeugungsanlagen mit den entsprechenden spezifischen Investitionen und Flächenverbrauch. Die folgende Tabelle gibt einen Überblick über die Effizienz der zentralen Sektorkopplungspfade.

*Tabelle 24: Beispielhafte Gesamtwirkungsgrade der Nutzung von erneuerbarem Strom in unterschiedlichen Umwandlungspfaden (Quelle: eigene Zusammenstellung auf Basis von (Agora Verkehrswende & Agora Energiewende, 2018))*

Sektor	Pfad Elektrifizierung	Pfad synthetische Brennstoffe
<b>Verkehr</b> (auf Fahrleistung in km bezogen)	<ul style="list-style-type: none"> <li>Batteriebetriebenes Elektroauto: 69%</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Brennstoffzellenauto: 26%</li> <li>Auto mit Verbrennungsmotor: 13%</li> </ul>
<b>Wärme</b> (auf kWhth bezogen)	<ul style="list-style-type: none"> <li>Wärmepumpe: ca. 300%</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Gasbrennwertkessel mit Methan: 50%</li> <li>Brennstoffzellenheizung: 24% (die Hälfte der verbleibenden Energie wird wieder zu Strom umgewandelt)</li> </ul>

Aus dieser Betrachtung der Wirkungsgrade folgt, dass die direkte Nutzung von Strom in den genannten Bereichen eine geringere Menge an erneuerbar erzeugtem Strom benötigt als eine Nutzung der synthetisch erzeugten Energieträger Wasserstoff und Methan. Eine Untersuchung von (Klein et al., 2017) hat ergeben, dass eine maximale Elektrifizierung des Energiesystems einen erneuerbaren

Stromerzeugungsbedarf von 1.923TWh verursacht. Eine „optimierte“ Versorgung mit verstärkter Nutzung von synthetischen Brennstoffen benötigt einen erneuerbaren Stromerzeugungsbedarf von 2.170TWh.

Insbesondere aufgrund von Investitionen in Infrastruktur bestehen zum Teil Lock-in Effekte innerhalb der Pfade. Diese entstehen, sobald Investitionen in relevantem Ausmaß in Infrastrukturen fließen. Diese Infrastrukturen mit Lock-In Potenzial werden in der folgenden Tabelle aufgeführt.

*Tabelle 25: Relevante neue Infrastrukturen in unterschiedlichen Sektorkopplungspfaden (Quelle: Öko-Institut)*

<b>Sektor</b>	<b>Pfad Elektrifizierung</b>	<b>Pfad synthetische Brennstoffe</b>	<b>Pfad Import synthetischer Brennstoffe</b>
<b>Verkehr</b>	Ladesäulen Oberleitungen		Infrastruktur zum Import von synth. Brennstoffen
<b>Wärme</b>	Wärmepumpen Wärmenetze		Infrastruktur zum Import von synth. Brennstoffen
<b>Strom</b>	Ausbau Stromnetz	Verstärkter Ausbau EE- Erzeugungsanlagen, um Um- wandlungsverluste zu kompen- sieren  Umwandlungstechnologien als neue Nachfrager (Elektrolyseu- re) Verteilinfrastruktur für P2G & P2L ertüchtigen oder neubauen	

Es ist davon auszugehen, dass die hier skizzierten Pfade „Elektrifizierung“ und „synthetische Brennstoffe“ Extremszenarien sind und sich in der Realität ein Technologiemix einstellen wird. Diese Tendenz zeigen auch unterschiedliche Modellierungsstudien (enervis energy advisors GmbH, 2017; Öko-Institut & Fraunhofer ISI, 2015a). Trotzdem können Infrastrukturentscheidungen in einzelnen Bereichen dazu führen, dass ein spezifischer Pfad eingeschlagen wird und die Realität einem Extremszenario näher kommt als dem anderen.

Aus heutiger Sicht erscheinen zwei Infrastrukturentscheidungen einen besonderen Einfluss auf das zukünftige Energiesystem zu generieren. Zum einen der Ausbau der Ladesäuleninfrastruktur für Elektromobilität im Verkehrssektor und zum anderen der Ausbau der Stromübertragungsnetze.

## Stakeholder-Positionen

Für eine Nutzung erneuerbaren Stroms zur Synthese von Wasserstoff und Methan spricht sich besonders der Deutsche Verein der Gaswirtschaft (DVGW) aus (DVGW, 2015). Der weiträumige Stromtransport von Norden nach Süden könne so reduziert werden (DVGW, 2013) und eine erfolgreiche Energiewende sei nur mit dem Energieträger Gas durchführbar (DVGW, 2017a). Auch Greenpeace energy sieht synthetisches Erdgas als eine für das Gelingen der Energiewende notwendige Technologie an (Greenpeace Energy, 2017). Prof. Michael Sterner von der Technischen Hochschule Regensburg betont, dass die Verwendung der Power-to-Gas Technologie eine Ergänzung des Technologiemies im Rahmen der Energiewende zur Sektorkopplung darstelle, allerdings keineswegs einen Netzausbau ersetzen kann. Zusätzlich sei diese Technologie derzeit nicht betriebswirtschaftlich darstellbar (Sterner, 2014). Auch die Strategieplattform Power to Gas betont die zukünftige Rolle dieser Technologie, besonders im Bereich der Sektorkopplung und als Langzeitspeicher im Stromsystem sei sie ein wichtiger Baustein. Es sei daher schon heute eine Klarstellung als Nicht-Letzterverbraucher notwendig um Investitionen zu ermöglichen (Strategieplattform Power to Gas, 2013). Im Rahmen der Debatte um synthetische Kraftstoffe treten auch weitere Stakeholder aus der Automobil und Aviation Industrie in die Diskussion ein. Hier ist insbesondere die PtX Allianz hervorzuheben, die grundlegende Änderungen im Rechtsrahmen fordert, um PtX Pfade wirtschaftlich zu ermöglichen (aireg et al., 2017).

### 3.4.2. Bioenergie im Stromsektor vs. Wärmesektor vs. Verkehrssektor

#### Fragestellung/Problemaufriss

Biomasse stellt als erneuerbare organische Kohlenstoffquelle eine flexible Ressource dar, die für unterschiedliche Zwecke Verwendung finden kann, zum Beispiel einerseits als Nahrungs- oder Futtermittel sowie andererseits als Energieträger für eine energetische Nutzung (UBA, 2014). Diese Konkurrenzsituation ist Gegenstand der „Tank oder Teller“ Diskussion (Thrän, 2017). Ursache für diese Konkurrenz ist die Knappheit der Ressource, die aus begrenzten landwirtschaftlichen Flächen und einem steigendem Bedarf folgt. Im Folgenden soll die Frage diskutiert werden, wie der Einsatz von Biomasse im Energiesektor gestaltet werden kann. Ausgangspunkt dafür ist, dass der Ernährungssektor eine vorrangige Rolle einnimmt und die energetische Nutzung von Biomasse erst nach einer Befriedigung der Bedürfnisse des Ernährungssektors zum Einsatz kommt (UBA, 2012a). Neben dem Anbau von Energiepflanzen wie Mais oder Pappeln, kommen auch biogene Rest- und Abfallstoffe für eine energetische Nutzung in Frage. Dazu zählen beispielsweise Waldrestholz, Landschaftspflegematerial, Stroh und Gülle sowie getrennt erfasste Bioabfälle.

*Tabelle 26: Übersicht der Ausgestaltungsmöglichkeiten im Bereich Bioenergie (Quelle: Eigene Darstellung)*

Möglichkeit	Beschreibung	Pro	Contra
Einsatz im Stromsektor	Holz oder Biogas wird in Heizkraftwerken oder Blockheizkraftwerken zur Strom- und Wärmeerzeugung genutzt.	Bedarfsgerechte erneuerbare Stromerzeugung zum Ausgleich von Wind- und PV-Strom ist möglich.	Begrenzt Biomassepotenzial, auch im Vergleich zur installierten Wind- und PV-Leistung, reduziert die Möglichkeit dieser Anwendung.
Einsatz im Wärmesektor	Neben der Wärmeerzeugung in KWK Anlagen wird Biomasse auch zur dezentralen Wärmebereitstellung eingesetzt (z.B. Holz oder Biomethan).	Holzfeuerungsanlagen sind eine etablierte und weit verbreitete Technologie, für die Nutzung von Biomethan kann eine bestehende Gasheizung weiter verwendet werden.	Heizenergie kann in sanierten Gebäuden auch effizient durch den Einsatz von Wärmepumpen und Solarthermie erzeugt werden. Der Einsatz von Biomasse ist daher eine Option für unsanierte Gebäude. Holzfeuerungen können zu Feinstaubbelastungen führen.
Einsatz im Verkehrssektor	Biomasse wird als Treibstoff für die Fortbewegung benutzt (Biomass to Liquid).	Es besteht wenig Anpassungsbedarf bei Antriebstechnologien um eine Nutzung zu ermöglichen. Derzeit wenig Alternativen zur Überbrückung weiter Strecken.	Begrenzt Biomassepotenzial, auch im Vergleich zur hohen Nachfrage nach Kraftstoffen, reduziert die Möglichkeit dieser Anwendung.

#### Unsicherheiten und externe Treiber

Nutzbare Menge an Bioenergie

#### Wechselwirkungen mit anderen Richtungsentscheidungen

Flexibilitätsbedarf und ausgeglichener vs. fokussierter Flexibilitätätmix

Umstieg auf elektrische Antriebe und / oder Effizienzsteigerung verbrennungsmotorischer Antriebe

Hoher vs. geringer Anteil erneuerbarer Energien im Stromsektor

Netzausbau vs. alternative Optionen (incl. Flexibilität)

Verstärkt Effizienz/Dämmen vs. verstärkt erneuerbare Energien zur Wärmeerzeugung

Die drei um die energetische Nutzung von Biomasse konkurrierenden Sektoren sind hier der Strom-, Wärme- sowie der Mobilitätssektor. Unabhängig vom verwendeten Sektor ist zu berücksichtigen, dass der Gestaltungsraum der Bioenergienutzung in erster Linie die Verteilung zwischen und die Verwendung in den individuellen Sektoren ist. Der Grund dafür ist das begrenzte Flächenpotenzial zum Anbau von Biomasse sowie das begrenzte Potenzial an biogenen Reststoffen (FVEE, 2015).

Die Potenziale zur energetischen Nutzung von Biomasse im Strom- und Wärmesektor setzen sich zum einen aus biogenen Reststoffen und zum anderen aus Anbaubiomasse zusammen. Aktuell wurden im Jahr 2015 etwa 1.100 PJ Biomasse als Primärenergieträger in Deutschland gewonnen (AGEB, 2017). Gemäß der Satellitenbilanz Erneuerbare Energien<sup>18</sup> entfallen knapp die Hälfte davon auf feste Biomasse (505 PJ), etwa ein Drittel auf gasförmige Biomasse (325 PJ) und jeweils rund 10 % auf Biokraftstoffe und den biogenen Anteil im Abfall (139 PJ bzw. 129 PJ).

Unter der Annahme eines Reststoffanteils von rund 25 % im Biogasaufkommen (z.B. Gülle und Bioabfälle) und einem nahezu vollständigen Reststoffanteil bei der festen Biomasse (v.a. Waldrestholz) resultiert ein Biomasseeinsatz aus Reststoffen von 713 PJ im Jahr 2015. Basierend auf der Potenzialstudie zu biogenen Reststoffen von Brosowski et al., 2015 erhöht sich das Reststoffpotenzial auf 830 PJ im Jahr 2020 und 1.165 PJ ab dem Jahr 2030.

Für das Jahr 2020 wurde dabei ein Erschließungsgrad des bislang ungenutzten Reststoffpotenzials von 25 % und ab dem Jahr 2030 von 100 % unterstellt. Der Hauptzuwachs geht dabei auf das bislang ungenutzte Reststoffpotenzial von Waldrestholz, forstwirtschaftlichen Reststoffen, Landschaftspflegematerial und Stroh zurück (Brosowski et al., 2015, S. 13). Zudem verdoppelt sich das erschlossene Reststoffpotenzial für gasförmige Biomasse, v.a. aus Gülle und Siedlungsabfällen, ab 2030 im Vergleich zu 2015 (Brosowski et al., 2015, S. 13).

Das aus dem biogenen Anteil im Abfall resultierende Biomassepotenzial wurde für das Jahr 2020 konstant fortgeschrieben und ab dem Jahr 2030 auf 100 PJ reduziert, um die erhöhte Nutzung als getrennt erfasste Biomassefraktion zu berücksichtigen.

Das Biomassepotenzial aus Anbaubiomasse wird über die verfügbare Anbaufläche und den spezifischen Flächenertrag abgeschätzt. Während für die Anbaufläche aufgrund des Flächendrucks ein leichter Rückgang des Flächenpotenzials auf 2 Millionen Hektar unterstellt wird, wird beim spezifischen Flächenertrag von einem moderaten Anstieg ausgegangen. Dieser resultiert aus einem Wechsel der angebauten Pflanzenarten hin zu ertragsstärkeren Pflanzen, wie z.B. Mais oder Pappeln aus Kurzumtrieb-Plantagen (KUP). In Summe bleibt das Potenzial aus Anbaubiomasse mit rund 400 PJ annähernd konstant (siehe Tabelle 27).

Tabelle 27: Biomasseeinsatz 2015 und erschließbare Biomassepotenziale 2020 und 2050 (Quelle: (Brosowski et al., 2015), (AGEB, 2017), eigene Berechnungen Öko-Institut e.V)

	2015	2020	2030	2050
<b>Reststoffe</b>				
Feste Biomasse	504 PJ	570 PJ	880 PJ	880 PJ
Gasförmige Biomasse	80 PJ	100 PJ	155 PJ	155 PJ
Biogener Anteil im Abfall	129 PJ	130 PJ	100 PJ	100 PJ
Summe Reststoffe	713 PJ	800 PJ	1.135 PJ	1.135 PJ
<b>Anbaubiomasse</b>				

<sup>18</sup> <https://ag-energiebilanzen.de/7-0-Bilanzen-1990-2015.html>

Anbaufläche	2,4 Mio. ha	2,4 Mio. ha	2,0 Mio. ha	2,0 Mio. ha
Flächenertrag	160 GJ/ha	170 GJ/ha	180 GJ/ha	200 GJ/ha
Summe Anbaubiomasse	384 PJ	408 PJ	360 PJ	400 PJ
<b>Biomasse gesamt (gerundet)</b>	<b>1.100 PJ</b>	<b>1.200 PJ</b>	<b>1.500 PJ</b>	<b>1.550 PJ</b>

## Beschreibung der Ausgestaltungsmöglichkeiten

### *Biomasse wird im Stromsektor eingesetzt*

Die Nutzung von Biomasse im Stromsektor birgt gegenüber der fluktuierenden Stromerzeugung durch Photovoltaik und Windkraftanlagen den Vorteil, dass eine bedarfsgerechte Stromerzeugung stattfinden kann. Dabei sind in Zukunft unterschiedliche Funktionen denkbar, die durch die Bioenergie erfüllt werden können.

Neben einer wärmegeführten Nutzung zur gekoppelten Strom- und Wärmeerzeugung besteht die Möglichkeit Bioenergie durch Flexibilisierung gezielt zur Unterstützung des Stromsystems einzusetzen. Dieser Einsatz birgt besonders großes Potenzial als Flexibilitätsoption zum Ausgleich von Erzeugungsüberschüssen und –defiziten variabler erneuerbarer Energien. Ebenso ist ein Einsatz zur Verhinderung negativer Spotmarktpreise oder ein Einsatz im Regelenergiemarkt denkbar (IZES, 2014).

Das Potenzial zur Stromerzeugung aus Biomasse ist in Deutschland jedoch auf 30 TWh bis 50 TWh begrenzt und die installierte elektrische Leistung von Biomasseanlagen bewegt sich im Bereich von 6 GW bis 8 GW. Im Vergleich zu der um den Faktor 20 bis 30 höheren installierten elektrischen Leistung von Wind- und PV-Anlagen wird der begrenzte Einfluss von Bioenergieanlagen deutlich (BNetzA, 2018).

### *Biomasse wird im Wärmesektor eingesetzt*

Biomasse wird in unterschiedlichen Heizungstechnologien als Brennstoff genutzt. Vorrangig wird heute feste Biomasse in Form von Brennholz, Hackschnitzeln und Pellets verwendet. Im Bereich dieser Anlagen finden sich Effizienzpotenziale, da in der Vergangenheit in erster Linie Scheitholzöfen mit geringen Wirkungsgraden und fehlender Abgasreinigung verwendet wurden. Hier wird es in Zukunft zu einer Substitution durch (automatisierte) Holzpellet-Öfen/-Kessel kommen, die höhere Wirkungsgrade sowie eine verbesserte Abgasreinigung erreichen, insbesondere hinsichtlich der Feinstaubemissionen in Städten. Neben der Nutzung fester Biomasse ist ebenso die Nutzung gasförmiger Biomasse möglich, insbesondere als aus Biogas aufbereitetes Biomethan. Die Verwendung von flüssiger Biomasse (Pflanzenöle) in BHKWs findet kaum noch statt.

Neben einer Nutzung von Bioenergie im Wärmesektor besteht ebenso die Möglichkeit einer Effizienzsteigerung zur Reduktion des Wärmebedarfs in Gebäuden (vgl. Kapitel Verstärkt Effizienz/Dämmen vs. verstärkt erneuerbare Energien). Durch Effizienzmaßnahmen im Bereich der energetischen Gebäudesanierung, wie zum Beispiel Wärmedämmung, kann der Bedarf an Wärmeenergie in Zukunft weiter reduziert werden. Der verbleibende Energiebedarf kann zu einem Teil durch die Verwendung von Biogas und –masse geschehen. Anzustreben ist jedoch die vorrangige Nutzung von effizienten Technologien wie Solarthermie oder Wärmepumpen (FVEE, 2015), so dass Biomasse gezielt für Gebäude eingesetzt werden kann, wo Solarthermie und Wärmepumpen nicht ausreichen oder möglich sind, zum Beispiel in schlecht sanierten Gebäuden.

### *Bioenergie im Mobilitätssektor*

Für die Nutzung von Bioenergie im Mobilitätssektor gibt es verschiedene Ansätze. Hierbei stehen sich die Synthetisierung von Biodiesel und Bioethanol, die Aufbereitung von Biogas zu Biomethan sowie die Gewinnung von Kraftstoffen durch Biomass to Liquid (BtL) gegenüber.

Während Biodiesel durch die Umesterung von Pflanzenölen hergestellt wird, wird Bioethanol durch die Vergärung von Zucker gewonnen. Im Fall von Biodiesel kommen somit ölhaltige Pflanzenarten, wie z.B. Raps oder Sonnenblumen, zum Einsatz. Im Fall von Bioethanol sind es zuckerhaltige Pflanzen wie Zuckerrüben oder Zuckerrohr.

Aus Biogas aufbereitetes Biomethan kann in Erdgasfahrzeugen eingesetzt werden.

Biomasse kann im Mobilitätssektor durch das Biomass to Liquid (BtL) Verfahren als Kraftstoff Anwendung finden. Ein großtechnischer Einsatz erfolgt derzeit jedoch nicht. Feste Biomasse (insbesondere Holz und Stroh) werden hierbei über verschiedene Zwischenschritte (Vergasung und Haber-Bosch-

Synthese) schlussendlich zu einem flüssigen Kraftstoff synthetisiert. Produkt dieses Vorgangs ist ein Gemisch langkettiger Kohlenwasserstoffe, die in einem weiteren Aufbereitungsschritt in BtL-Benzin sowie BtL-Diesel umgewandelt werden (Stöcker, 2008).

## **Gegenüberstellung der Ausgestaltungsmöglichkeiten**

Unabhängig von der Verwendung der Bioenergie ist zu erkennen, dass das deutsche Bioenergiepotenzial nur anteilig den Energiebedarf der Sektoren Strom, Wärme und Verkehr decken kann. Im Rahmen der Verwendung inländischer Biomasse ist es daher notwendig zu definieren, wo und wie diese Nutzung erfolgen soll.

Eine Verteilung der vorhandenen Biomasse kann nach unterschiedlichen Ansätzen erfolgen. Ausschlaggebend für die Nutzungshierarchie können die durch die Nutzung der Biomasse erreichten vermiedenen Emissionen sein. Dabei würde Biomasse zunächst in dem Sektor zum Einsatz kommen, in dem die größte Menge an CO<sub>2</sub> pro eingesetzter Einheit Biomasse vermieden wird. Demgegenüber ist ebenso denkbar Biomasse in den Sektoren einzusetzen, in denen eine Emissionsvermeidung durch andere Optionen nur schwer umzusetzen ist. Auch wenn weniger Emissionen durch diesen Einsatz verhindert werden können als in einem anderen Sektor, ist dies womöglich die einzige sektorspezifische Möglichkeit, Emissionen zu vermeiden. Dies ist beispielsweise bei Kraftstoffen für Flugzeuge, schwere Bau- und Landmaschinen und Schiffe der Fall, ebenso wie für denkmalgeschützte Gebäude, die sich nicht auf eine wärmepumpentaugliches Niveau sanieren lassen.

Ebenso ist eine Kaskadennutzung der Biomasse denkbar, in der *„Rohstoffe oder daraus hergestellte Produkte in zeitlich aufeinanderfolgenden Schritten so lange, so häufig und so effizient wie möglich stofflich zu nutzen und erst am Ende des Produktlebenszyklus energetisch zu verwerten“* (UBA, 2012b). Ziel ist es bei dieser Nutzungsform einen größtmöglichen positiven Umwelteinfluss zu erzielen, ohne auf einen bestimmten Indikator wie Emissionen zu fokussieren.

Von einem zeitlichen Gesichtspunkt aus betrachtet könnte die Nutzung der Biomasse flexibel gestaltet werden. Als Brückentechnologie könnte die Biomassenutzung eine technologische Lücke füllen, bis eine andere Technologie für den substituierenden Einsatz bereit ist. Dabei sind allerdings technologische Lock-In Effekte zu vermeiden um einen flexiblen Wechsel des Energieträgers zu ermöglichen. Beispielsweise könnte Biomasse in Form von Biomethan im Wärme- und Mobilitätssektor zum Einsatz kommen, bis Elektrofahrzeuge und Wärmepumpen diese Technologieformen ablösen. Gleiches gilt für den Einsatz von Holz zur Wärmeerzeugung in Gebäuden. Die dann nicht mehr benötigte Biomasse könnte im Stromsektor zur flexiblen Stromerzeugung sowie für die oben genannten Spezialanwendungen genutzt werden.

## **Stakeholder-Positionen**

Die (DUH, 2018) betont, dass Bioenergie trotz ihres Potenzials zur Dekarbonisierung, bei ihrer Nutzung eine Konkurrenz zur Nutzung von Biomasse als Lebensmittel ausgeschlossen werden muss. Für eine Nutzung der Bioenergie in allen Sektoren plädiert der Bundesverband Bioenergie (BBE, 2017). Im Stromsektor soll Bioenergie zur Bereitstellung von gesicherter Leistung und Flexibilität dienen. Ein Fokus liegt besonders auf dem Ausbau der Nutzung im Wärmesektor im Bereich Industrie, Fern- und Nahwärme. Ebenso soll eine Nutzung von Biokraftstoffen im Mobilitätssektor weiter vorangetrieben werden. Bis zum Jahr 2050 soll die Bioenergie ein fester Pfeiler der deutschen Energieversorgung sein, was besonders durch Effizienz bei der Nutzung und dem Energiebedarf ermöglicht wird. Der (FVEE, 2010) sieht die Bioenergie im Wärmesektor als Brückentechnologie an, die bis zur weiten Verbreitung der Nutzung von energieeffizienten strombasierten Technologien wie z.B. Wärmepumpen zum Einsatz kommt. Ein Großteil der Bioenergie solle zur effizienten gekoppelten Bereitstellung von Strom und Wärme dienen. Der Verkehrssektor könne zu einem großen Teil durch die direkte Nutzung von Strom und mit Brennstoffzellen versorgt werden. Nur ein kleiner Teil der benötigten Energie würde aus Bioenergie stammen um nicht elektrifizierbare Verkehrsträger, wie Flugzeuge und Schiffe, zu versorgen.

## 4 LITERATURVERZEICHNIS

- 50 Hertz Transmission (50 Hertz); Amprion; TenneT TSO & TransnetBW (2017). Netzentwicklungsplan Strom 2030 Szenariorahmen Version 2017. Ausführliche Fassung. 50 Hertz Transmission (50 Hertz); Amprion; TenneT TSO; TransnetBW, zuletzt abgerufen am 06.10.2017.
- Adolf, J.; Balzer, C.; Haase, F.; Lenz, B.; Lischke, A. & Knitschky, G. (2016). Shell Nutzfahrzeug-Studie: Diesel oder Alternative Antriebe - Womit fahren LKW und Bus morgen? Fakten, Trends und Perspektiven bis 2040 (Shell Deutschland Oil, Hrsg.). Hamburg: Shell Deutschland Oil; Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR).
- Adolf, J.; Balzer, C.; Joedicke, A.; Schabla, U.; Wibrand, K.; Rommerskirchen, S.; Anders, N.; Mauer, A. auf der; Ehrentraut, O.; Krämer, L. & Straßburg, S. (2014). Shell PKW-Szenarien bis 2040. Fakten, Trends und Perspektiven für Automobilität (Shell Deutschland Oil, Hrsg.). Hamburg: Shell Deutschland Oil; Prognos.
- AfD (2017). Programm für Deutschland. Wahlprogramm der Alternative für Deutschland für die Wahl zum Deutschen Bundestag am 24. September 2017 (Wahlprogramm), zuletzt abgerufen am 15.02.2018.
- Agentur für Erneuerbare Energien (AEE) (2013). Entwicklung der Volllaststunden von Kraftwerken in Deutschland.
- Agentur für Erneuerbare Energien (AEE) (2016). Metaanalyse - Flexibilität durch Kopplung von Strom, Wärme & Verkehr, Berlin, zuletzt abgerufen am 10.05.2016.
- Agethen, U.; Frahm, K.-J.; Renz, K. & Thees, E. P. (2008). Lebensdauer von Bauteilen, Zeitwerte (Bund Technischer Experten (BTE), Hrsg.), zuletzt abgerufen am 12.12.2014.
- Agora Energiewende (2016a). Eigenversorgung aus Solaranlagen. Das Potenzial für Photovoltaik-Speicher-Systeme in Ein- und Zweifamilienhäusern, Landwirtschaft sowie im Lebensmittelhandel (Agora Energiewende, Hrsg.). Berlin: Prognos; RAP, zuletzt abgerufen am 10.07.2018.
- Agora Energiewende (2016b). Elf Eckpunkte für einen Kohlekonsens. Konzept zur schrittweisen Dekarbonisierung des deutschen Stromsektors (Langfassung). Berlin: enervis energy advisors.
- Agora Energiewende (2017). Energiewende 2030: The Big Picture. Berlin: Agora Energiewende, zuletzt abgerufen am 14.06.2017.
- Agora Energiewende; Consentec & Fraunhofer Institut für Windenergie und Energiesystemtechnik (Fraunhofer IWES) (2013). Kostenoptimaler Ausbau der Erneuerbaren Energien in Deutschland. Ein Vergleich möglicher Strategien für den Ausbau von Wind- und Solarenergie in Deutschland bis 2033 (Agora Energiewende, Hrsg.), Berlin.
- Agora Verkehrswende (2017). Mit der Verkehrswende die Mobilität von morgen sichern. 12 Thesen zur Verkehrswende (Kurzfassung). Verfügbar unter [https://www.agora-verkehrswende.de/fileadmin/Projekte/2017/12\\_Thesen/Agora-Verkehrswende-12-Thesen-Kurzfassung\\_WEB.pdf](https://www.agora-verkehrswende.de/fileadmin/Projekte/2017/12_Thesen/Agora-Verkehrswende-12-Thesen-Kurzfassung_WEB.pdf), zuletzt abgerufen am 08.03.2018.

- Agora Verkehrswende (2018). Die Fortschreibung der Pkw-CO<sub>2</sub>-Regulierung und ihre Bedeutung für das Erreichen der Klimaschutzziele im Verkehr. Studie im Auftrag von Agora Verkehrswende.
- Agsten, M.; Bauknecht, D.; Becker, A.; Brinker, W.; Conrads, R.; Diebels, V.; Erge, T.; Feuerhahn, S.; Heinemann, C.; Hermsmeier, J.; Hollinger, R.; Klose, T.; Koch, M.; Mayer, C.; Pistor, G.; Rosinger, C.; Rüttinger, H.; Schmedes, T. & Stadler, M. (2012). Abschlussbericht eTelligence. Neue Energien brauchen neues Denken (BMU & BMWI, Hrsg.). Oldenburg: Öko-Institut; EWE. Verfügbar unter [http://www.e-energy.de/documents/eTelligence\\_Projektbericht\\_2012.pdf](http://www.e-energy.de/documents/eTelligence_Projektbericht_2012.pdf).
- Ahmels, P. (2017). Die nächsten Schritte der Energiewende. Forderungen der Deutschen Umwelthilfe (Deutsche Umwelthilfe (DUH), Hrsg.), zuletzt abgerufen am 11.10.2017.
- Allgemeiner Deutscher Fahrrad-Club (Bundesverband) (ADFC) (2010): Empfehlungen für Radverkehrsanlagen. Online verfügbar unter: <https://www.adfc.de/verkehr--recht/recht/stvo--co/era/empfehlungen-fuer-radverkehrsanlagen>, zuletzt geprüft am 31.05.2018.
- Allgemeiner Deutscher Fahrrad-Club (Bundesverband) (ADFC) (2017): ADFC-Bundeshauptversammlung 2017 in Berlin. Online verfügbar unter: <http://www.adfc.de/news/bhv-2017-in-berlin>, zuletzt geprüft am 24.05.2018.
- Apel, R.; Aundrup, T.; Buchholz, B. M.; Domels, H. P.; Funke, Stephan, Gesing, Thomas; Glaunsinger, W.; Gronstedt, P.; Heins, F.; Höhle, A.; Knack, V.; Küter, T.; Stötzer, M.; Struwe, C.; Styczynski, Z.; Scheven, A. von & Seidl, H. (2012). Ein notwendiger Baustein der Energiewende: Demand Side Integration. Lastverschiebungspotenziale in Deutschland. Kurzfassung (Verband der Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik (VDE), Hrsg.). Frankfurt a. M.: Energietechnische Gesellschaft im VDE (ETG).
- Arbeitsgemeinschaft Energiebilanzen (AGEB) (2017). Auswertungstabellen zur Energiebilanz Deutschland. 1990 bis 2016. Verfügbar unter <http://www.ag-energiebilanzen.de/10-0-Auswertungstabellen.html>, zuletzt abgerufen am 02.11.2017.
- Arndt, W.-H.; Beckmann, K. J.; Grabow, B.; Eberlein, M.; Döge, N.; Fathejalali, A. & Kämpfer, R. (2013). Kommunale Straßenbrücken. Zustand und Erneuerungsbedarf (Deutsches Institut für Urbanistik (difu), Hrsg.) (Difu-Impulse 6/2013), Berlin.
- Arnhold, Oliver; Decker, Hanna; Schachler, Birgit; Fleck, Marlon; Goldammer, Kathrin (2016): Energiewende im Verkehr: Welche Auswirkungen haben Batterie- und Brennstoffzellenfahrzeuge auf das Energiesystem? Hg. v. Reiner Lemoine Institut. Online verfügbar unter: [https://reiner-lemoine-institut.de/wp-content/publications/20161011\\_GasuEnergie/20160909\\_GasUEnergie\\_Auswirkungen\\_nderVerkehrswende.pdf](https://reiner-lemoine-institut.de/wp-content/publications/20161011_GasuEnergie/20160909_GasUEnergie_Auswirkungen_nderVerkehrswende.pdf), zuletzt geprüft am 24.05.2018.
- Årskaug, K. (2016). National Transport Plan 2018-2029. English Summary (Avinor, Norwegian National Rail Administration, Norwegian Coastal Administration & Norwegian Public Roads Administration, Hrsg.), Oslo. Verfügbar unter <https://www.ntp.dep.no/English/attachment/1525049/binary/1132766?ts=1571e02a3c0>, zuletzt abgerufen am 19.03.2018.
- Aviation Initiative for Renewable Energy in Germany (aireg); Audi; Deutscher Verein des Gas- und Wasserfaches (DVGW); Deutscher Wasserstoff-Brennstoffzellen Verband; Ontras Gastransport & Uniper Energy Storage (2017). Eckpunktepapier für ein Markteinführungsprogramm von Power-To-X-Technologien (Aviation Initiative for Renewable Energy in Germany (aireg), Audi, Deutscher Verein des Gas- und Wasserfaches (DVGW), Deutscher Wasserstoff-Brennstoffzellen Verband,

- Ontras Gastransport & Uniper Energy Storage, Hrsg.). Verfügbar unter [https://www.uniper.energy/storage/sites/default/files/2017-12/2017\\_0kt\\_eckpunktepapier\\_power\\_to\\_x\\_allianz.pdf](https://www.uniper.energy/storage/sites/default/files/2017-12/2017_0kt_eckpunktepapier_power_to_x_allianz.pdf), zuletzt abgerufen am 03.05.2018.
- B.KWK (2018). Pressemitteilung: Deutschland braucht KWK für die Wärmewende! Der B.KWK stellte die Ergebnisse der Kurzstudie vor. Verfügbar unter <http://www.bkww.de/presse-oeffentlichkeit/pressemitteilungen/detail/deutschland-braucht-kwk-fuer-die-waermewende/>, zuletzt abgerufen am 04.05.2018.
- Baptista, Patrícia; Melo, Sandra; Rolim, Catarina (2014): Energy, Environmental and Mobility Impacts of Car-sharing Systems. Empirical Results from Lisbon, Portugal. In: Procedia - Social and Behavioral Sciences 111, S. 28–37. DOI: 10.1016/j.sbspro.2014.01.035.
- Bartle, C.; Calvert, T.; Hüging, B.; Jain, H.; Melia, J.; Mingardo, S.; Rudolph, G.; Ricci, M.; Parkin, J.; Streng, M. (2016): The Economic Benefits of Sustainable Urban Mobility Measures. Independent Review of Evidence: Reviews. Hg. v. Shergold, I. Online verfügbar unter: [http://www.eltis.org/sites/default/files/report\\_in\\_depth\\_reviews\\_of\\_measures.pdf](http://www.eltis.org/sites/default/files/report_in_depth_reviews_of_measures.pdf), zuletzt geprüft am 31.05.2018.
- Bauknecht, D.; Heinemann, C.; Koch, M.; Ritter, D.; Harthan, R.; Sachs, A.; Vogel, M.; Tröster, E. & Langanke, S. (2016). Systematischer Vergleich von Flexibilitäts- und Speicheroptionen im deutschen Stromsystem zur Integration von erneuerbaren Energien und Analyse entsprechender Rahmenbedingungen (Öko-Institut, Hrsg.). Freiburg, Darmstadt: Öko-Institut; energynautics. Verfügbar unter [https://www.oeko.de/fileadmin/oekodoc/Systematischer\\_Vergleich\\_Flexibilitaetsoptionen.pdf](https://www.oeko.de/fileadmin/oekodoc/Systematischer_Vergleich_Flexibilitaetsoptionen.pdf), zuletzt abgerufen am 19.01.2017.
- Bayrische Staatskanzlei (2017): Bayrische Bauordnung (12.07.2017).
- Becker, Sophia; Rudolf, Clemens (2018): Exploring the Potential of Free Cargo-bikesharing for Sustainable Mobility. In: GAIA - Ecological Perspectives for Science and Society 27 (1), S. 156–164. BDL – Bundesverband der Deutschen Luftverkehrswirtschaft (2017): CO<sub>2</sub>-Wachstum kompensieren. CORSIA: das globale marktbasierende Klimaschutzinstrument für den internationalen Luftverkehr. Online verfügbar unter: <https://www.bdl.aero/de/themenpositionen/klimaschutz/co2-wachstum-kompensieren/>, zuletzt geprüft am 25.05.2018.
- Bergk, F.; Biemann, K.; Heidt, C.; Knörr, W.; Lambrecht, U.; Schmidt, T.; Ickert, L.; Schmied, M.; Schmidt, P. & Weindorf, W. (2017a). Klimaschutzbeitrag des Verkehrs bis 2050. Im Auftrag des Umweltbundesamtes (Umweltbundesamt, Hrsg.) (TEXTE 56/2016). Dessau-Roßlau: Institut für Energie- und Umweltforschung (IFEU); Infrac; Ludwig-Bölkow-Systemtechnik.
- Bergk, F.; Knörr, W.; Lambrecht, U. & Institut für Energie- und Umweltforschung (IFEU) (2017b). Klimaschutz im Verkehr: Neuer Handlungsbedarf nach dem Pariser Klimaschutzabkommen. Teilbericht des Projekts „Klimaschutzbeitrag des Verkehrs 2050“. Im Auftrag des Umweltbundesamtes (Umweltbundesamt, Hrsg.).
- Bernath, C.; Bossmann, T.; Deac, G.; Elsland, R.; Fleiter, T.; Kühn, A.; Pfluger, B.; Raggwitz, M.; Rehfeldt, M.; Sensfuß, F. & Steinbach, J. (2017a). Langfristszenarien für die Transformation des Energiesystems in Deutschland. Modul 1: Hintergrund, Szenarioarchitektur und übergeordnete Rahmenparameter Studie im Auftrag des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie. Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung (Fraunhofer ISI); Consentec; Institut für Ener-

gie- und Umweltforschung (IFEU); Technische Universität Wien; M-Five; TEP Energy.

- Bernath, C.; Bossmann, T.; Deac, G.; Elsland, R.; Fleiter, T.; Kühn, A.; Pfluger, B.; Ragwitz, M.; Rehfeldt, M.; Sensfuß, F.; Steinbach, A.; Cronenberg, A.; Ladermann, A.; Linke, C.; Maurer, C.; Tersteegen, B.; Willemsen, S.; Franke, B.; Kautertz, B.; Pehnt, M.; Rettenmaier, N.; Hartner, M.; Kranzl, L.; Schade, W.; Catenazzi, G.; Jakob, M. & Reiter, U. (2017b). Langfristszenarien für die Transformation des Energiesystems in Deutschland. Modul 3: Referenzszenario und Basisszenario (Bundesminister für Wirtschaft und Energie (BMWi), Hrsg.). Verfügbar unter [http://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Downloads/B/berichtsmodul-3-referenzszenario-und-basisszenario.pdf?\\_\\_blob=publicationFile&v=4](http://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Downloads/B/berichtsmodul-3-referenzszenario-und-basisszenario.pdf?__blob=publicationFile&v=4), zuletzt abgerufen am 06.09.2017.
- BET (2015). Gibt es Alternativen zum Netzausbau? München: BET, zuletzt abgerufen am 08.09.2017.
- Blanck, Ruth; Zimmer, Wiebke (2016): Sektorale Emissionspfade in Deutschland bis 2050 – Verkehr. Hg. v. Öko-Institut; Fraunhofer ISI. Online verfügbar unter: <https://www.oeko.de/oekodoc/2517/2016-047-de.pdf>, zuletzt geprüft am 24.05.2018.
- Blanck, Ruth; Hacker, Florian; Heyen, Dirk-Arne; Zimmer, Wiebke; Bergmann, Thomas; Griebshammer, Rainer; Schönau, Manuela; Schumacher, Katja (2017): Mobiles Baden-Württemberg – Wege der Transformation zu einer nachhaltigen Mobilität. Hg. v. Baden-Württemberg-Stiftung. Stuttgart. Online verfügbar unter: [https://www.bwstiftung.de/uploads/tx\\_news/BWS\\_SR\\_MobilesBW\\_A4\\_web\\_interaktiv\\_01.pdf](https://www.bwstiftung.de/uploads/tx_news/BWS_SR_MobilesBW_A4_web_interaktiv_01.pdf), zuletzt geprüft am 24.05.2018.
- Bogensperger, A.; Lienert, C.; Zeiselmaier, A.; Köppl, S. & Estermann, T. (2017). Flexibilitätsintegration als wichtiger Baustein eines effizienten Energiesystems. Eine FfE-Kurzstudie im Rahmen der Projekte MONA 2030 und C/sells. Forschungsstelle für Energiewirtschaft (FfE). Verfügbar unter [https://www.ffe.de/attachments/article/708/20170322\\_Flexibilit%C3%A4tsintegration\\_Kurzstudie.pdf](https://www.ffe.de/attachments/article/708/20170322_Flexibilit%C3%A4tsintegration_Kurzstudie.pdf), zuletzt abgerufen am 01.08.2017.
- BP Europa & Uniper (Hrsg.) (2017). Die Power-to-Gas-Technologie für Raffinerieprozesse.
- Bracker, J. & Timpe, C. (2017). An outline of sustainability criteria for synthetic fuels used in transport. Policy paper for Transport & Environment. Freiburg: Öko-Institut. Verfügbar unter <https://www.oeko.de/fileadmin/oekodoc/Sustainability-criteria-for-synthetic-fuels.pdf>, zuletzt abgerufen am 08.03.2018.
- Brosowski, A.; Adler, P.; Erdmann, G.; Stinner, W. & Thrän, D. (2015). Biomassepotenziale von Rest- und Abfallstoffen. Status Quo in Deutschland (Fachagentur nachwachsende Rohstoffe, Hrsg.) (Schriftenreihe nachwachsende Rohstoffe), Gülzow-Prüzen, zuletzt abgerufen am 16.11.2017.
- Bruns, E.; Futterlieb, M.; Ohlhorst, D. & Wenzel, B. (2012). Netze als Rückgrat der Energiewende - Hemmnisse für die Integration erneuerbarer Energien in Strom-, Gas- und Wärmenetze. Berlin: Technische Universität Berlin.
- Bund für Umwelt und Naturschutz Deutschland (BUND) – Friends of Earth Germany (ohne Datum): Mit dem Rad umwelt- und gesundheitsbewusst mobil in der Stadt. Online verfügbar unter: <https://www.bund.net/mobilitaet/infrastruktur/stadtverkehr/rad/>, zuletzt geprüft am 24.05.2018.

- Bund für Umwelt und Naturschutz (BUND) (2011). Zukunftsfähige Energiepolitik. Berlin: Bund für Umwelt und Naturschutz (BUND), zuletzt abgerufen am 20.03.2017.
- Bund für Umwelt und Naturschutz (BUND) (2014). Der BUND-Abschaltplan: Laufzeitbegrenzung für die ältesten Braunkohleblöcke bis 2020 (Bund für Umwelt und Naturschutz Deutschland, Hrsg.).
- Bund für Umwelt und Naturschutz (BUND) (2016). Stellungnahme zum Entwurf des Bundeswirtschaftsministeriums zum EEG 2016. Berlin: Bund für Umwelt und Naturschutz (BUND), zuletzt abgerufen am 01.03.2017.
- Bund für Umwelt und Naturschutz Deutschland (BUND) – Friends of Earth Germany (2017): Meilensteine nachhaltiger Mobilität: Verkehrsagenda 2020/2030. Hintergrundinformationen. Online verfügbar unter: [https://www.bund.net/fileadmin/user\\_upload\\_bund/publikationen/bund/bundestagswahl/nachhaltige\\_mobilitaet\\_hintergrundinformation.pdf](https://www.bund.net/fileadmin/user_upload_bund/publikationen/bund/bundestagswahl/nachhaltige_mobilitaet_hintergrundinformation.pdf), zuletzt geprüft am 24.05.2018.
- Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU) (2010). Langfristszenarien und Strategien für den Ausbau der erneuerbaren Energien in Deutschland bei Berücksichtigung der Entwicklung in Europa und global. „Leitstudie 2010“ (BMU, Hrsg.). Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR); Fraunhofer Institut für Windenergie und Energiesystemtechnik (Fraunhofer I-WES); IfnE. Verfügbar unter [http://elib.dlr.de/69139/1/Leitstudie\\_2010.pdf](http://elib.dlr.de/69139/1/Leitstudie_2010.pdf).
- Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit (BMU) (2016): Klimaschutzplan 2050. Klimapolitische Grundsätze und Ziele der Bundesregierung, Online verfügbar unter: [https://www.bmu.de/fileadmin/Daten\\_BMU/Download\\_PDF/Klimaschutz/klimaschutzplan\\_2050\\_bf.pdf](https://www.bmu.de/fileadmin/Daten_BMU/Download_PDF/Klimaschutz/klimaschutzplan_2050_bf.pdf), zuletzt geprüft am 25.05.2018.
- Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur (2016a): Wie geht...? Verkehrsinfrastruktur. Online verfügbar unter: <http://www.bmvi.de/DE/Themen/Mobilitaet/Strasse/Deutschlands-Radverkehr-Kompakt/deutschlands-radverkehr-kompakt.html>, zuletzt geprüft am 24.05.2018.
- Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur (2016b): Bundesverkehrswegeplan 2030. Online verfügbar unter: <http://www.bmvi.de/DE/Themen/Mobilitaet/Infrastrukturplanung-Investitionen/Bundesverkehrswegeplan-2030/bundesverkehrswegeplan-2030.html>, zuletzt geprüft am 31.05.2018.
- Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur (2017a): Initiative Klimafreundlicher Straßengüterverkehr. Fahrplan für einen klimafreundlichen Straßengüterverkehr. Online verfügbar unter: <https://www.bmvi.de/SharedDocs/DE/Anlage/MKS/initiative-klimafreundlicher-strassengueterverkehr.pdf?blob=publicationFile>, zuletzt geprüft am 25.05.2018.
- Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur (2017b): Luftverkehr bildet heute einen wichtigen Teil der modernen Verkehrsinfrastruktur. Online verfügbar unter: <http://www.bmvi.de/DE/Themen/Mobilitaet/Luft/Luftverkehr/luftverkehr.html>, zuletzt geprüft am 24.05.2018.
- Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur (2017c): Fahrradverkehr. Online verfügbar unter: <http://www.bmvi.de/DE/Themen/Mobilitaet/Strasse/Fahrradverkehr/fahrradverkehr.html>, zuletzt geprüft am 31.05.2018.

- Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur (2018a): Deutschlands Radverkehr boomt. Online verfügbar unter: <http://www.bmvi.de/SharedDocs/DE/Artikel/G/BVWP/bundesverkehrswegeplanung-g-video-wie-geht-bundesverkehrswegeplanung.html>; zuletzt geprüft am 24.05.2018. Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur (2018b): Infrastruktur als Grundlage für Wachstum, Arbeit und Wohlstand. Online verfügbar unter <http://www.bmvi.de/DE/Themen/Mobilitaet/Infrastrukturplanung-Investitionen/Infrastruktur-kompakt/infrastruktur-kompakt.html>, zuletzt geprüft am 31.05.2018.
- Bundesverband GRÜNE LIGA (2017): Neue Initiative für Nachtzüge mit Vorschlag: Deutsche Bahn und Österreichische Bundesbahnen bilden gemeinsame Nachtzug-Tochter. Online verfügbar unter: <http://www.bahn-fuer-alle.de/pages/bestandsaufnahme/neue-initiative-fuer-nachtzuege-mit-vorschlag.php>, zuletzt geprüft am 24.05.2018.
- Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi) (2014). Ein Strommarkt für die Energiewende. Diskussionspapier des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie (Grünbuch). BMWI, zuletzt abgerufen am 20.12.2016.
- Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi) (Hrsg.) (2015). Eckpunkte-Papier „Strommarkt“.
- Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi) (2016a). Strom 2030. Langfristige Trends - Aufgaben für die kommenden Jahre. Berlin: BMWI, zuletzt abgerufen am 20.12.2016.
- Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi) (Hrsg.) (2016b). Fünfter Monitoring-Bericht zur Energiewende. Die Energie der Zukunft. Berichtsjahr 2015, Berlin. Verfügbar unter <http://www.bmwi.de/BMWi/Redaktion/PDF/Publikationen/fuenfter-monitoring-bericht-energie-der-zukunft,property=pdf,bereich=bmwi,sprache=de,rwb=true.pdf>, zuletzt abgerufen am 15.12.2016.
- Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi) (Hrsg.) (2017). Strom 2030: Langfristige Trends – Aufgaben für die kommenden Jahre. Ergebnisbericht zum Trend 7: „Moderne KWK-Anlagen produzieren den residualen Strom und tragen zur Wärmewende bei“, Berlin, zuletzt abgerufen am 15.02.2018.
- Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi) (Hrsg.) (2018). Zahlen und Fakten Energiedaten. Nationale und Internationale Entwicklung.
- Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi) & Deutsche Energie Agentur (dena) (2013). Workshop „Flexibilität von Bestandskraftwerken - Entwicklungsoptionen für den Kraftwerkspark durch Retrofit“, Berlin.
- Bundesnetzagentur (BNetzA) (2018). Genehmigung des Szenari Rahmens 2019-2030, Bonn.
- Bundesnetzagentur (BNetzA) & Bundeskartellamt (2017). Monitoringbericht 2017. Elektrizitätsmarkt - Entwicklungen auf den Elektrizitätsmärkten, Bonn. Verfügbar unter [https://www.bundesnetzagentur.de/SharedDocs/Downloads/DE/Sachgebiete/Energie/Unternehmen\\_Institutionen/DatenaustauschUndMonitoring/Monitoring/Monitoring2017\\_Kapitel/E\\_Markt2017.pdf?\\_\\_blob=publicationFile&v=1](https://www.bundesnetzagentur.de/SharedDocs/Downloads/DE/Sachgebiete/Energie/Unternehmen_Institutionen/DatenaustauschUndMonitoring/Monitoring/Monitoring2017_Kapitel/E_Markt2017.pdf?__blob=publicationFile&v=1), zuletzt abgerufen am 23.05.2019.
- Bundesregierung der Bundesrepublik Deutschland (BReg) (Hrsg.) (2007). Das Integrierte Energie- und Klimaprogramm der Bundesregierung.
- Bundesregierung der Bundesrepublik Deutschland (BReg) (2010). Energiekonzept für eine umweltschonende, zuverlässige und bezahlbare Energieversorgung, Berlin.

- Bundesregierung der Bundesrepublik Deutschland (BReg) (2017). Projektionsbericht 2017 für Deutschland. gemäß Verordnung (EU) Nr. 525/2013, Berlin.
- Bundestag, D. (2016). Deutscher Bundestag, Drucksache 18/8131. Antrag „Kohleausstieg einleiten – Strukturwandel sozial absichern“ von den Abgeordneten Eva Bulling-Schröter, Birgit Wöllert, Hubertus Zebel, Caren Lay, Herbert Behrens, Karin Binder, Matthias W. Birkwald, Heidrun Bluhm, Dr. André Hahn, Andrej Hunko, Ulla Jelpke, Susanna Karawanskij, Kerstin Kassner, Katja Kipping, Katrin Kunert, Sabine Leidig, Ralph Lenkert, Michael Leutert, Dr. Gesine Löttsch, Thomas Lutze, Birgit Menz, Norbert Müller (Potsdam), Thomas Nord, Harald Petzold (Havelland), Dr. Kirsten Tackmann und der Fraktion DIE LINKE.
- Bundesverband BioEnergie (BBE) (2017). Die Zukunft der Bioenergie. Perspektiven und Ziele der Bioenergiebranche bis 2050 (Bundesverband BioEnergie (BBE), Hrsg.), Berlin, zuletzt abgerufen am 14.06.2018.
- Bundesverband Braunkohle (DEBRIV) (2017). Braunkohle steht für Sicherheit in der Stromversorgung. Positionsbestimmung und Zukunftsorientierung auf dem Braunkohlentag 2017 (04.05.2017). Köln.
- Bundesverband Braunkohle (DEBRIV) (2018). Ohne Braunkohle keine sichere Energieversorgung – Heimischer Rohstoff wird noch Jahrzehnte gebraucht. Braunkohlentag 2018 in Halle (Saale) / Reviere brauchen Zeit und verlässliche Rahmenbedingungen für Strukturwandel. Halle.
- Bundesverband Bürgerinitiativen gegen Südlink (2017). BUND und BBGSt starten Offensive gegen überdimensionierten Stromnetzausbau – Bundesverband der Bürgerinitiativen gegen SuedLink, Bundesverband Bürgerinitiativen gegen Südlink. Verfügbar unter <http://bundesverband-gegen-suedlink.de/?p=1065>, zuletzt abgerufen am 19.09.2017.
- Bundesverband der Deutschen Binnenschifffahrt (2017): EBU unterstützt Forderung nach Masterplan Güterschifffahrt. Online verfügbar unter: <https://www.binnenschiff.de/content/ebu-unterstuetzt-forderung-nach-masterplan-queterschifffahrt/>, zuletzt geprüft am 25.05.2018.
- Bundesverband der deutschen Bioethanolwirtschaft (2016). EU-Kommission veröffentlicht Vorschlag für neue Richtlinie Erneuerbare Energien - Bioethanol bleibt wichtige Säule für besseren Klimaschutz im Verkehr. Verfügbar unter <https://www.presseportal.de/pm/73390/3498296>.
- Bundesverband der Deutschen Heizungsindustrie (BDH) (2016). Stellungnahme zum Klimaschutzplan 2050 im Kontext wirtschaftlicher, politischer und rechtlicher Realitäten, zuletzt abgerufen am 13.02.2018.
- Bundesverband der Deutschen Heizungsindustrie (BDH); Deutscher Raiffeisenverband (DRV); Haus & Grund; Institut für Wärme und Oeltechnik (IWO); Zentralverband Sanitär Heizung Klima (ZVSHK) & Zukunft Erdgas (2017). Klimaschutz technologieoffen gestalten: Effiziente Heizsysteme weiter fördern! Positionspapier, zuletzt abgerufen am 13.02.2018.
- Bundesverband der deutschen Industrie (BDI) (2016). Stellungnahme. EEG 2016 und WindSeeG. Berlin: Bundesverband der deutschen Industrie (BDI), zuletzt abgerufen am 01.03.2017.
- Bundesverband der Energie- und Wasserwirtschaft (BDEW) (2013). Erschließung von Flexibilitätsoptionen und deren Einordnung. Berlin: Bundesverband der Energie- und Wasserwirtschaft (BDEW), zuletzt abgerufen am 29.09.2017.
- Bundesverband der Energie- und Wasserwirtschaft (BDEW) (2016). Impulspapier Strom 2030. Berlin: Bundesverband der Energie- und Wasserwirtschaft (BDEW), zuletzt abgerufen am 20.03.2017.

- Bundesverband der Energie- und Wasserwirtschaft (BDEW) (2017a). 10 Thesen zur Sektorkopplung. Positionspapier, Berlin.
- Bundesverband der Energie- und Wasserwirtschaft (BDEW) (2017b). Zukunft Wärmenetzsysteme (Strategiepapier), zuletzt abgerufen am 13.02.2018.
- Bundesverband der Energie- und Wasserwirtschaft (BDEW) & Der Energieeffizienzverband für Wärme, Kälte und KWK (AGFW) (Hrsg.) (2013). Kraft-Wärme-Kopplung ist zum Erreichen der energiepolitischen Ziele unverzichtbar. Pressemitteilung, zuletzt abgerufen am 15.02.2018.
- Bundesverband energieeffiziente Gebäudehülle (BuVEG) (2017). Die Gebäudehülle - Lebensräume gestalten, Lebensqualität erhöhen. Politische Positionen, zuletzt abgerufen am 14.02.2018.
- Bundesverband Erneuerbare Energie (BEE) (2013). Möglichkeiten zum Ausgleich fluktuierender Einspeisungen aus Erneuerbaren Energien (Bundesverband Erneuerbare Energie (BEE), Hrsg.).
- Bundesverband Erneuerbare Energie (BEE) (2017a). Bundesverband Erneuerbare Energie: Aufgaben und Ziele, BEE. Verfügbar unter <https://www.bee-ev.de/home/verband/aufgaben-und-ziele/>, zuletzt abgerufen am 15.11.2017.
- Bundesverband Erneuerbare Energie (BEE) (2017b). Effizient Erneuerbar: Was JETZT zum Gelingen einer Erneuerbaren Wärmewende getan werden muss. BEE-Positionspapier zur Einstellung der Förderung für fossil befeuerte Heizungen im Rahmen eines Fördersystems im Einklang mit den Energie- und Klimazielen, zuletzt abgerufen am 14.02.2018.
- Bundesverband Erneuerbare Energie (BEE) (2018). Erneuerbare können mehr. Unsere Positionen (29.01.2018), zuletzt abgerufen am 14.02.2018.
- Bundesverband Öffentlicher Binnenhäfen (2017): Pressemitteilung: Binnenhäfen fordern Schutz für Hafenstandorte und integrierten Ansatz für den Güterverkehr. Online verfügbar unter: [www.binnenhafen.de/wp-content/uploads/2017/06/2017-10-19-Binnen%C3%A4fen-fordern-Schutz-f%C3%BCr-Hafenstandorte-und-integrierten-Ansatz-f%C3%BCr-den-G%C3%BCterverkehr.pdf](http://www.binnenhafen.de/wp-content/uploads/2017/06/2017-10-19-Binnen%C3%A4fen-fordern-Schutz-f%C3%BCr-Hafenstandorte-und-integrierten-Ansatz-f%C3%BCr-den-G%C3%BCterverkehr.pdf), zuletzt geprüft am 25.05.2018.
- Bundesverband Wärmepumpe (2016). Position des Bundesverband Wärmepumpe (BWP) zur Definition des Niedrigstenergiegebäude-Standards (nZEB) sowie zum Abgleich von EnEV und EEWärmeG, zuletzt abgerufen am 14.02.2018.
- Bündnis 90 / Die Grünen (2017). Zukunft wird aus Mut gemacht. Bundestagswahlprogramm 2017 (Wahlprogramm), zuletzt abgerufen am 15.02.2018.
- Burger, B. (2017). Optimaler Mix zwischen PV- und Windstromerzeugung. Fraunhofer-Institut für solare Energiesysteme (Fraunhofer ISE), zuletzt abgerufen am 29.11.2017.
- Bürger, V.; Hesse, T.; Palzer, A.; Köhler, B.; Herkel, S. & Engelmann, P. (2017). Klimaneutraler Gebäudebestand 2050. Energieeffizienzpotentiale und die Auswirkungen des Klimawandels auf den Gebäudebestand. Endbericht (Umweltbundesamt (UBA), Hrsg.) (Climate Change 11/2017). Dessau-Roßlau: Öko-Institut; Fraunhofer-Institut für solare Energiesysteme (Fraunhofer ISE).
- Bürgerdialog Stromnetz (2015). Kurz & Knapp: Alternativen zum Netzausbau. Spart eine dezentrale Energiewende Netzausbau? Bürgerdialog Stromnetz, zuletzt abgerufen am 19.09.2017.
- Büro für Energiewirtschaft und technische Planung GmbH (BET); Trianel GmbH (2015a). Potentiale regelbarer Lasten in einem Energieversorgungssystem mit wachsendem Anteil erneuerbarer Energien (Umweltbundesamt (UBA), Hrsg.) (Climate Change 19/2015), Dessau-Roßlau.

- C.A.R.M.E.N. (2014). Akzeptanz für Erneuerbare Energien. München: Bayrisches Staatsministerium für Wirtschaft und Medien, Energie und Technologie; Bayerisches Staatsministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Forsten; LandSchaftEnergie, zuletzt abgerufen am 16.01.2018.
- Cames, M. & Deuber, O. (2003). Emissions trading in international civil aviation (Öko-Institut, Hrsg.) (Final report on R&D Project No. 201 96 107 of UFOPLAN 2001), Berlin.
- Cargobike.jetzt (2018): Kaufprämien für Cargobikes: der Überblick. Online verfügbar unter <http://www.cargobike.jetzt/kaufpraemien/>, zuletzt geprüft am 24.05.2018.
- CDU (2017). Für ein Deutschland, in dem wir gut und gerne leben. Regierungsprogramm 2017 – 2021 (Wahlprogramm), zuletzt abgerufen am 15.02.2018.
- Changing Cities (2018a): Aktuell. Online verfügbar unter: <http://changing-cities.org/>, zuletzt geprüft am 24.05.2018.
- Changing Cities (2018b): Verkehrswende von unten nicht aufzuhalten: Radentscheid Darmstadt erfolgreich gestartet. Online verfügbar unter: <https://volksentscheid-fahrrad.de/de/2018/02/08/verkehrswende-von-unten-nicht-aufzuhalten-radentscheid-darmstadt-erfolgreich-gestartet-4136/>, zuletzt geprüft am 24.05.2018.
- Changing Cities (2018c): Volksentscheid Berlin Werbefrei. Online verfügbar unter: <https://berlin-werbefrei.de/>, zuletzt geprüft am 24.05.2018.
- CSU (2017). Der Bayernplan. Klar für unser Land (Wahlprogramm), zuletzt abgerufen am 15.02.2018.
- Danish Ministry of Climate, Energy and Building (2012). DK Energy Agreement, zuletzt abgerufen am 16.05.2018.
- DEBRIV (2016). Beitrag der Kohle zur Transformation der deutschen Stromversorgung. Berlin: DEBRIV.
- Der Energieeffizienzverband für Wärme, Kälte und KWK (AGFW) (2015). Die 70/70-Strategie. Konzept und Ergebnisse, zuletzt abgerufen am 20.02.2018.
- Deutsche Bundesregierung (2010). Energiekonzept für eine umweltschonende, zuverlässige und bezahlbare Energieversorgung. Beschluss des Bundeskabinetts vom 28.09.2010, Berlin. Verfügbar unter <http://www.bundesregierung.de/Content/DE/Anlagen/2012/02/energiekonzept-final.pdf?blob=publicationFile&v=5>, zuletzt abgerufen am 15.11.2012.
- Deutsche Energie Agentur (dena) (2016a). Demand Side Management - Unternehmen als Anbieter für Flexibilität im Energiesystem. Ergebnisse aus dem Pilotprojekt Demand Side Management Baden-Württemberg. Berlin: Deutsche Energie Agentur (dena), zuletzt abgerufen am 02.10.2017.
- Deutsche Energie Agentur (dena) (2016b). Potenzialatlas Power to Gas. Klimaschutz umsetzen, erneuerbare Energien integrieren, regionale Wertschöpfung ermöglichen. Berlin: DENA, zuletzt abgerufen am 30.03.2017.
- Deutsche Energie Agentur (dena) (2017). Taskforce Netzentgelte, dena. Verfügbar unter <https://www.dena.de/themen-projekte/projekte/energiesysteme/taskforce-netzentgelte/>, zuletzt abgerufen am 02.10.2017.
- Deutsche Energie Agentur (dena) & Allianz für Gebäude-Energie-Effizienz (geea) (Hrsg.) (2016). Energieeffizienz in Gebäuden: hoher Handlungsdruck, hohes Potenzial, Berlin, zuletzt abgerufen am 11.10.2017.
- Deutsche Energie Agentur (dena) & Allianz für Gebäude-Energie-Effizienz (geea) (2017). Gebäude-Energiewende braucht offene Technologiepfade, Bezahlbarkeit und Akzeptanz. Ein Thesenpapier der Deutschen Energie-Agentur (dena), der Al-

- lianz für Gebäude-Energie-Effizienz (geea) und weiterer Verbände aus dem Bereich Gebäudeenergieeffizienz., zuletzt abgerufen am 14.02.2018.
- Deutsche Energie Agentur (dena); Technische Universität Dortmund/ ef. Ruhr GmbH & Brunekreeft, G. (2012). dena-Verteilnetzstudie. Ausbau- und Innovationsbedarf der Stromverteilnetze in Deutschland bis 2030 (Deutsche Energie Agentur (dena), Hrsg.), Berlin.
- Deutsche Umwelthilfe (DUH) (Deutsche Umwelthilfe (DUH), Hrsg.) (2015). Netzausbau sorgt für mehr Klimaschutz. Verfügbar unter <http://www.duh.de/pressemitteilung/netzausbau-sorgt-fuer-mehr-klimaschutz/>, zuletzt abgerufen am 19.09.2017.
- Deutsche Umwelthilfe (DUH) (2017). Sektorenkopplung: Klimaschutz mit Strom für Wärme und Verkehr, Berlin, zuletzt abgerufen am 19.01.2017.
- Deutsche Umwelthilfe (DUH) (2018). Bioenergie - Chance für das 3. Jahrtausend, DUH. Verfügbar unter <https://www.duh.de/netzwerkbioenergie/chancen-risiken/>, zuletzt abgerufen am 14.06.2018.
- Deutsche Unternehmensinitiative Energieeffizienz (DENEFF) (2018). Für eine effiziente Energiewende. Empfehlungen an die neue Bundesregierung der Mitglieder des Beirats der Deutschen Unternehmensinitiative Energieeffizienz (DENEFF), zuletzt abgerufen am 16.02.2018.
- Deutscher Verein des Gas- und Wasserfaches (DVGW) (2017). DVGW bekräftigt Forderung nach Innovationsförderung für Power-to-X. Berlin.
- Deutscher Industrie und Handelskammertag (2015). Positionspapier: Die Energiewende zum Erfolg führen (Deutscher Industrie und Handelskammertag, Hrsg.), Berlin, zuletzt abgerufen am 20.03.2017.
- Deutscher Verein des Gas- und Wasserfaches (DVGW) (2013). Synergieeffekte Gas- und Stromnetze - Nutzung von Gasnetzen und -speichern für die Integration von Strom aus Erneuerbaren Energien und zur Entlastung der Stromnetze. Berlin: Deutscher Verein des Gas- und Wasserfaches (DVGW), zuletzt abgerufen am 21.03.2017.
- Deutscher Verein des Gas- und Wasserfaches (DVGW) (2014). Mit Gas-Innovationen in die Zukunft! Intelligente Technologien für die Energiewende, zuletzt abgerufen am 19.01.2018.
- Deutscher Verein des Gas- und Wasserfaches (DVGW) (2015). Nutzen der Power-to-Gas-Technologie zur Entlastung der 110-kV-Stromverteilungsnetze. Berlin: Deutscher Verein des Gas- und Wasserfaches (DVGW).
- Deutscher Verein des Gas- und Wasserfaches (DVGW) (Hrsg.) (2016). Stellungnahme zum Referentenentwurf EEG 2016, zuletzt abgerufen am 15.02.2018.
- Deutscher Verein des Gas- und Wasserfaches (DVGW) (2017a). DVGW: Energiewende nur mit Gas, energigate. Verfügbar unter <http://www.energate-messenger.de/news/178752/dvgw-energiewende-nur-mit-gas>, zuletzt abgerufen am 15.11.2017.
- Deutscher Verein des Gas- und Wasserfaches (DVGW) (2017b). Gas kann grün: mit grünen Gasen die Klimaschutzziele in allen Sektoren erreichen (Energie Impuls), zuletzt abgerufen am 14.02.2018.
- Deutscher Verein des Gas- und Wasserfaches (DVGW) (2017c). Klimaschutz in der Wärmeversorgung erfordert eine Modernisierung des Wärmemarkts – alle effizienten Lösungswege führen über Gas (Energie Impuls), zuletzt abgerufen am 14.02.2018.

- Deutsches Institut für Wirtschaftsforschung (DIW) (2015). Energiewende und Strommarktdesign: Zwei Preiszonen für Deutschland sind keine Lösung (DIW WOCHENBERICHT NR. 9/2015 VOM 25. Februar 2015).
- Deutsches Institut für Wirtschaftsforschung (DIW) (2016). „Eigenversorgung mit Solarstrom“ - ein Treiber der Energiewende?, DIW. Verfügbar unter [https://www.diw.de/de/diw\\_01.c.523538.de/presse/diw\\_roundup/eigenversorgung\\_mit\\_solarstrom\\_ein\\_treiber\\_der\\_energiewende.html](https://www.diw.de/de/diw_01.c.523538.de/presse/diw_roundup/eigenversorgung_mit_solarstrom_ein_treiber_der_energiewende.html), zuletzt abgerufen am 10.07.2018.
- Die Bahnindustrie. Verband der Bahnindustrie in Deutschland (VDB) (2016): Mobilität und Klimaschutz: Deutschland braucht eine entschlossene Politik für mehr Schienenverkehr. Online verfügbar unter: [http://bahnindustrie.info/de/positionen/vdb-positionspapier/detail/mobilitaet\\_und\\_klimaschutz\\_deutschland\\_braucht\\_eine\\_entschlossene\\_politik\\_fuer\\_mehr\\_schienenverkehr/](http://bahnindustrie.info/de/positionen/vdb-positionspapier/detail/mobilitaet_und_klimaschutz_deutschland_braucht_eine_entschlossene_politik_fuer_mehr_schienenverkehr/), zuletzt geprüft am 25.05.2018.
- Die deutschen Bischöfe - Kommission für gesellschaftliche und soziale Fragen (2013). Empfehlungen zur Energiewende. Ein Diskussionsbeitrag. Die deutschen Bischöfe - Kommission für gesellschaftliche und soziale Fragen, zuletzt abgerufen am 01.03.2017.
- Die Grünen (2017). Wir steigen um – komplett auf grüne Energien, Die Grünen. Verfügbar unter <https://www.gruene.de/programm-2017/a-bis-z/wir-steigen-um-komplett-auf-gruene-energien.html>, zuletzt abgerufen am 15.11.2017.
- Die Linke (2017). Sozial. Gerecht. Frieden. Für alle. Die Zukunft, für die wir kämpfen! (Wahlprogramm), zuletzt abgerufen am 15.02.2018.
- DLR; Institut für Energie- und Umweltforschung (IFEU); LBST; DBFZ (2015). Erneuerbare Energien im Verkehr. Potenziale und Entwicklungsperspektiven verschiedener erneuerbarer Energieträger und Energieverbrauch der Verkehrsträger, Berlin, zuletzt abgerufen am 07.04.2017.
- DLR/Infas (2010): Mobilität in Deutschland 2008. Ergebnisbericht Struktur – Aufkommen – Emissionen – Trends. im Auftrag des BMVBS. Bonn und Berlin.
- Dörr, H.; Graf, F.; Köppel, W.; Burmeister, F.; Senner, J.; Nitschke-Kowsky, P. & Weßing, W. (2016). Untersuchungen zur Einspeisung von Wasserstoff in ein Erdgasnetz. energie | wasser-praxis (11), S. 50–59. Verfügbar unter [http://www.dvgw-ebi.de/download/ewp\\_1116\\_50-59\\_Kroeger.pdf](http://www.dvgw-ebi.de/download/ewp_1116_50-59_Kroeger.pdf), zuletzt abgerufen am 16.11.2017.
- ECF; Artelys; Climact & Element Energy (2016). A Perspective on Infrastructure and Energy Security in the Transition (ECF, E3G, Cambridge Institute for Sustainable Leadership, RAP, Agora Energiewende & WWF, Hrsg.), zuletzt abgerufen am 03.04.2017.
- Ecklundt, Björn (2016): Wachstum nach ICAO: 700 Prozent mehr fliegen – 0 Prozent mehr Emissionen!, In: Klima der Gerechtigkeit. Online verfügbar unter: <http://klima-der-gerechtigkeit.de/2016/09/29/wachstum-nach-icao-700-prozent-mehr-fliegen-0-prozent-mehr-emissionen/>, zuletzt geprüft am 25.05.2018.
- ECN (2012). Flow-based market coupling: Stepping stone towards nodal pricing? Amsterdam: ECN, zuletzt abgerufen am 04.10.2017.
- Einemo, U. (2017). Switch to alternative fuels “relentless and inevitable”. The international bunker industry association. Verfügbar unter <https://ibia.net/switch-to-alternative-fuels-relentless-and-inevitable/>, zuletzt abgerufen am 08.03.2018.
- enervis energy advisors (2017). Klimaschutz durch Sektorkopplung: Optionen, Szenarien, Kosten, Berlin. Verfügbar unter <http://www.enervis.de/images/stories/>

[enervis/pdf/publikationen/gutachten/](#)

[170321\\_enervis\\_Studie\\_Klimaschutz\\_durch\\_Sektorenkopplung.pdf](#), zuletzt abgerufen am 20.04.2017.

- Enquete-Kommission (2002). Nachhaltige Energieversorgung unter den Bedingungen der Globalisierung und der Liberalisierung - Endbericht.
- Erhard, J.; Reh, W.; Treber, M.; Oeliger, D.; Rieger, D. & Müller-Görnert, M. (2014). Klimafreundlicher Verkehr in Deutschland. Weichenstellungen bis 2050 (World Wide Fund for Nature, Bund für Umwelt und Naturschutz Deutschland, Germanwatch, Naturschutzbund Deutschland & Verkehrsclub Deutschland, Hrsg.). Öko-Institut.
- (2016). Erkelenzer Appell für eine Energieversorgung ohne Braunkohle. Germanwatch et. al. Verfügbar unter <http://zukunft-statt-braunkohle.de/ueber-uns/erkelenzer-appell/>, zuletzt abgerufen am 20.04.2018.
- ewi Energy Research & Scenarios (2017). Energiemarkt 2030 und 2050 – Der Beitrag von Gas- und Wärmeinfrastruktur zu einer effizienten CO<sub>2</sub>-Minderung, zuletzt abgerufen am 16.02.2018.
- Falkenberg, H.; Wunsch, M.; Ambrosius, M.; Rückel, B. & Sölch, C. (2016). Dezentralität und zellulare Optimierung. Auswirkungen auf den Netzausbaubedarf (N-ERGIE Aktiengesellschaft, Hrsg.), Nürnberg, zuletzt abgerufen am 19.09.2017.
- FDP (2017a). Denken wir neu. Das Programm der Freien Demokraten zur Bundestagswahl 2017: „Schauen wir nicht länger zu.“ (Wahlprogramm), zuletzt abgerufen am 15.02.2018.
- FDP (2017b). Mit der Umsetzung der Energiewende können Klimaziele nicht erreicht werden, FDP. Verfügbar unter <https://www.fdp.de/umwelt-und-klimaschutz/mit-der-umsetzung-der-energiewende-koennen-klimaziele-nicht-erreicht-werden>, zuletzt abgerufen am 15.11.2017.
- Fernleitungsnetzbetreiber (2015). Netzentwicklungsplan Gas 2015 der Fernleitungsnetzbetreiber, zuletzt abgerufen am 03.03.2017.
- Figenbaum, E. & Kolbenstvedt, M. (2016). Learning from Norwegian Battery Electric and Plug-in Hybrid Vehicle users. Results from a survey of vehicle owners (Institute of Transport Economics (toi), Hrsg.), Oslo. Verfügbar unter <https://www.toi.no/getfile.php?mmfileid=43161>.
- Fischedick, Manfred; Grunwald, Armin; Requate, Till; Vetter, Dirk; Hirsch Hadorn, Gertrude; Robinius, Martin; Voß, Jan-Peter Canzler, Weert; Dieckhoff, Christian; Kasten, Peter; Thrän, Daniela (2017): Pfadabhängigkeiten in der Energiewende. Das Beispiel Mobilität. Hg. v. Fischedick, Manfred; Grunwald, Armin. Online verfügbar unter: [https://www.leopoldina.org/uploads/tx\\_leopublication/2017\\_ESYS\\_Analyse\\_Pfad\\_abhaengigkeiten.pdf](https://www.leopoldina.org/uploads/tx_leopublication/2017_ESYS_Analyse_Pfad_abhaengigkeiten.pdf), zuletzt geprüft am 24.05.2018.
- Fishman, Elliot; Washington, Simon; Haworth, Narelle (2013): Bike Share. A Synthesis of the Literature. In: Transport Reviews 33 (2), S. 148–165. Garthwaite, Josie (2011): To curb driving, cities cut down on car parking. Hg. v. National Geographic. Online verfügbar unter: <https://news.nationalgeographic.com/news/energy/2011/07/110713-cutting-down-on-city-parking/>, zuletzt geprüft am 24.05.2018.
- Forschungsverbund Erneuerbare Energien (FVEE) (2010). Energiekonzept 2050. Eine Vision für ein nachhaltiges Energiekonzept auf Basis von Energieeffizienz und 100 % erneuerbaren Energien. Berlin: Fraunhofer-Institut für Bauphysik (Fraunhofer IBP); Fraunhofer-Institut für solare Energiesysteme (Fraunhofer ISE); Fraunhofer Institut für Windenergie und Energiesystemtechnik (Fraunhofer I-

- WES); ISFH; Institut für ZukunftsEnergieSysteme (IZES); ZAE Bayern; Zentrum für Sonnenenergie- und Wasserstoff-Forschung (ZSW).
- Forschungsverbund Erneuerbare Energien (FVEE) (2015). Erneuerbare Energien im Wärmesektor. Aufgaben, Empfehlungen und Perspektiven. Positionspapier. Berlin: FVEE, zuletzt abgerufen am 16.05.2017.
- Fraunhofer Institut für Windenergie und Energiesystemtechnik; Fraunhofer Institut für Bauphysik; Ifeu & Stiftung Umweltenergierecht (2015). Interaktion EE-Strom, Wärme und Verkehr. Kurzfassung, Kassel.
- Fraunhofer Institut für Windenergie und Energiesystemtechnik (Fraunhofer IWES) (2013). Energiewirtschaftliche Bedeutung der Offshore-Windenergie für die Energiewende, Bremerhaven, zuletzt abgerufen am 29.11.2017.
- Fraunhofer Institut für Windenergie und Energiesystemtechnik (Fraunhofer IWES); Fraunhofer-Institut für Bauphysik (Fraunhofer IBP); Institut für Energie- und Umweltforschung (IFEU) & Stiftung Umweltenergierecht (2015). Interaktion EE-Strom, Wärme und Verkehr. Kurzfassung, Kassel.
- Fraunhofer Institut für Windenergie und Energiesystemtechnik (Fraunhofer IWES); IAEW RWTH Aachen & Stiftung Umweltenergierecht (2014). Roadmap Speicher. Speicherbedarf für erneuerbare Energien - Speicheralternativen - Speicheranreiz - Überwindung rechtlicher Hemmnisse, Kassel.
- Fraunhofer IWES/ IBP (2017). Wärmewende 2030. Schlüsseltechnologien zur Erreichung der mittel- und langfristigen Klimaschutzziele im Gebäudesektor. Studie im Auftrag von Agora Energiewende, Berlin.
- Fraunhofer-Institut für Fertigungstechnik und Angewandte Materialforschung (Fraunhofer IFAM) (2014). CO<sub>2</sub>-Quellen der Methanisierung, Fraunhofer IFAM. Verfügbar unter <http://www.bremer-energie-institut.de/mugristo/de/results/power-to-gas/co2-quellen.html>, zuletzt abgerufen am 14.06.2018.
- Fraunhofer-Institut für solare Energiesysteme (Fraunhofer ISE) (2012). 100 % Erneuerbare Energien für Strom und Wärme in Deutschland (Fraunhofer-Institut für solare Energiesysteme (Fraunhofer ISE), Hrsg.), Freiburg, zuletzt abgerufen am 16.12.2015.
- Fraunhofer-Institut für solare Energiesysteme (Fraunhofer ISE) (2013). ENERGIE-SYSTEM DEUTSCHLAND 2050 - Sektor- und Energieträgerübergreifende, modellbasierte, ganzheitliche Untersuchung zur langfristigen Reduktion energiebedingter CO<sub>2</sub>-Emissionen durch Energieeffizienz und den Einsatz Erneuerbarer Energien. Freiburg: Fraunhofer-Institut für solare Energiesysteme (Fraunhofer ISE). Verfügbar unter <http://www.ise.fraunhofer.de/de/veroeffentlichungen/veroeffentlichungen-pdf-dateien/studien-und-konzeptpapiere/studie-energiesystem-deutschland-2050.pdf>.
- Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung (Fraunhofer ISI) (2017). Netzentwicklungsplan Strom. Entwicklung der regionalen Stromnachfrage und Lastprofile. Karlsruhe: Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung (Fraunhofer ISI), zuletzt abgerufen am 14.02.2017.
- Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung (Fraunhofer ISI); Consen-tec & Institut für Energie- und Umweltforschung (IFEU) (2017). Langfristszenarien für die Transformation des Energiesystems in Deutschland, Karlsruhe, Aachen, Heidelberg, zuletzt abgerufen am 13.02.2018.
- Frontier Economics (2018). Die zukünftigen Kosten strombasierter synthetischer Brennstoffe (Agora Verkehrswende & Agora Energiewende, Hrsg.), Berlin. Verfügbar unter <https://www.agora-energiewende.de/fileadmin2/Projekte/2017/>

SynKost\_2050/Agora\_SynCost-Studie\_WEB.pdf, zuletzt abgerufen am 23.05.2018.

- Frontier Economics & Consentec (2011). Bedeutung von etablierten nationalen Gebotszonen für die Integration des europäischen Strommarkts ein Ansatz zur wohlfahrtsorientierten Beurteilung (Bundesnetzagentur (BNetzA), Hrsg.), Bonn, zuletzt abgerufen am 12.03.2018.
- Frontier Economics; IAEW; Management & EMCEL (2017). Der Wert der Gasinfrastruktur für die Energiewende in Deutschland. Eine modellbasierte Analyse (Ver-einigung der Fernleitungsnetzbetreiber, Hrsg.), zuletzt abgerufen am 11.10.2017.
- Gaspool (2011). Ermittlung des langfristigen Kapazitätsbedarfs. Bericht der im Marktgebiet GASPOOL tätigen marktgebietsaufspannenden Netzbetreiber zur Ermittlung des langfristigen Kapazitätsbedarfs gem. §17 GasNZV zum 1. April 2011. Gaspool, zuletzt abgerufen am 07.03.2017.
- GdW Bundesverband deutscher Wohnungs- und Immobilienunternehmen (2015). Wärmedämmung. Sinn und Zweck Brandschutz und Umweltschutz (Schwerpunkt Polystyrol) (GdW Information Nr. 147), zuletzt abgerufen am 14.02.2018.
- Gerbert, P.; Herhold, P.; Burchardt, J.; Schönberger, S.; Rechenmacher, F.; Kirchner, A.; Kemmler, A. & Wünsch, M. (2018). Klimapfade für Deutschland (BCG; Prognos). Berlin, Basel, Hamburg, München: The Boston Consulting Group (BCG); Prognos, zuletzt abgerufen am 13.02.2018.
- Gerhardt, N. & Sandau, F. (2015). Wie hoch ist der Stromverbrauch der Energiewende? Energiepolitische Zielszenarien 2050 - Rückwirkungen auf den Ausbaubedarf von Windenergie und Photovoltaik (Agora Energiewende, Hrsg.). Berlin: Fraunhofer Institut für Windenergie und Energiesystemtechnik (Fraunhofer I-WES), zuletzt abgerufen am 23.10.2015.
- Germanwatch (2016): Klimaschutz im Flugverkehr: Zu spät, zu schwach, zu wenig seriös. ICAO-Vollversammlung berät ab morgen unangemessenen Entwurf zum Klimaschutz. Online verfügbar unter: <https://germanwatch.org/de/12827>, zuletzt geprüft am 24.05.2018
- Gesellschaft Energietechnik (Presseportal, Hrsg.) (2011). Energiewende: VDI fordert beschleunigte Genehmigungsverfahren. Verfügbar unter <http://www.presseportal.de/pm/16368/2057937>, zuletzt abgerufen am 15.11.2017.
- Gesellschaft Energietechnik (Hrsg.) (2017). VDI-Grundsatzpapier Kraft-Wärme-Kopplung (KWK) in der Energiewende, zuletzt abgerufen am 15.02.2018.
- Goulden, Murray; Ryley, Tim; Dingwall, Robert (2014): Beyond predict and provide: UK transport, the growth paradigm and climate change. In: Transport Policy 32, S. 139-147.
- Green City (2018): Mehr Umweltschutz für München. Online verfügbar unter: <https://www.greencity.de/verein/>, zuletzt geprüft am 31.05.18.
- Greenpeace (2010). Klimaschutz: Plan B 2050 (Kurzfassung). Berlin: Greenpeace, zuletzt abgerufen am 02.03.2017.
- Greenpeace (2015). Klimaschutz: Der Plan. Energiekonzept für Deutschland (Greenpeace, Hrsg.), Hamburg.
- Greenpeace (2016). Erneuerbare Mobilität. Welche Rolle kann die E-Mobilität für die Verkehrswende spielen? (Greenpeace, Hrsg.). Hamburg: Innovationszentrums für Mobilität und gesellschaftlichen Wandel. Verfügbar unter [https://www.greenpeace.de/sites/www.greenpeace.de/files/publications/studie\\_erneuerbare\\_mobilitaet.pdf](https://www.greenpeace.de/sites/www.greenpeace.de/files/publications/studie_erneuerbare_mobilitaet.pdf), zuletzt abgerufen am 08.03.2018.
- Greenpeace (2017). Klimaschutz: Der Plan. Energiekonzept für Deutschland (Greenpeace, Hrsg.), Berlin.

- Greenpeace Energy (2017). Nutzen von Windgas, Greenpeace. Verfügbar unter <https://www.greenpeace-energy.de/privatkunden/windgas/unser-windgas-im-detail/nutzen-von-windgas.html>, zuletzt abgerufen am 16.11.2017.
- Greenpeace Energy (2015). Bedeutung und Notwendigkeit von Windgas für die Energiewende in Deutschland. Greenpeace Energy Windgas-Studie. Regensburg, Hamburg, Berlin: Forschungsstelle für Energienetze und Energiespeicher (FENES); OTH Regensburg; Energy Brainpool. Verfügbar unter [http://www.greenpeace-energy.de/fileadmin/docs/pressematerial/2015\\_FENES\\_EBP\\_GPE\\_Windgas-Studie.pdf](http://www.greenpeace-energy.de/fileadmin/docs/pressematerial/2015_FENES_EBP_GPE_Windgas-Studie.pdf), zuletzt abgerufen am 25.08.2015.
- Greiner, B. & Hermann, H. (2016). Sektorale Emissionspfade in Deutschland bis 2050 – Stromerzeugung. Arbeitspaket 1.2 im Forschungs- und Entwicklungsvorhaben des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit: Wissenschaftliche Unterstützung „Erstellung und Begleitung des Klimaschutzplans 2050“ (FKZ UM 15 41 1860). Berlin: Öko-Institut.
- Gruber, Johannes; Rudolph, Christian (2016): Untersuchung des Einsatzes von Fahrrädern im Wirtschaftsverkehr (WIV-RAD) (Schlussbericht). BMVI. Online verfügbar unter [https://www.bmvi.de/SharedDocs/DE/Anlage/VerkehrUndMobilitaet/Fahrrad/wiv-rad-schlussbericht.pdf?\\_\\_blob=publicationFile](https://www.bmvi.de/SharedDocs/DE/Anlage/VerkehrUndMobilitaet/Fahrrad/wiv-rad-schlussbericht.pdf?__blob=publicationFile), zuletzt geprüft am 22.02.2018.
- Hacker, F.; Blank, R.; Hülsmann, F.; Kasten, P.; Loreck, C.; Ludig, S.; Motschall, M. & Zimmer, W. (2014). eMobil 2050. Szenarien zum möglichen Beitrag des elektrischen Verkehrs zum langfristigen Klimaschutz, Berlin. Verfügbar unter <http://www.oeko.de/oekodoc/2114/2014-670-de.pdf>, zuletzt abgerufen am 19.01.2015.
- Handy, Susan; Thigpen, Calvin (2018): Commute quality and its implications for commute satisfaction: Exploring the role of mode, location and other factors. In: Travel Behaviour and Society, currently in press.
- Harrabin, R. (BBC, Hrsg.) (2017). New diesel and petrol vehicles to be banned from 2040 in UK. Verfügbar unter <http://www.bbc.com/news/uk-40723581>, zuletzt abgerufen am 19.03.2018.
- Hecking, H.; Hennes, O.; Elberg, C.; Frings, C.; Hintermayer, M.; Lencz, D.; Wildgrube, T.; Oschatz, B.; Winiewska, B.; Mailach, B.; Holm, A. & Kagerer, F. (2017). Szenarien für eine marktwirtschaftliche Klima- und Ressourcenschutzpolitik 2050 im Gebäudesektor. Gebäudestudie (Deutsche Energie Agentur (dena), Hrsg.). ewi Energy Research & Scenarios gGmbH (ewi); Institut für Technische Gebäudeausrüstung Dresden GmbH (ITG); Forschungsinstitut für Wärmeschutz München (FIW), zuletzt abgerufen am 26.02.2018.
- Heinemann, C.; Bürger, V.; Bauknecht, D.; Ritter, D. & Koch, M. (2014). Widerstandsheizungen: ein Beitrag zum Klimaschutz und zur Integration fluktuierender Erneuerbarer? Energiewirtschaftliche Tagesfragen 64 (5), S. 45–48.
- Heinemann, C.; Koch, M.; Ritter, D.; Vogel, M.; Harthan, R. & Bauknecht, D. (2016). Ökologische Bereitstellung von Flexibilität im Stromsystem. Freiburg: Öko-Institut.
- Helbig, N.; Sandau, J. & Heinrich, J. (2017). The Future of the Automotive Value Chain. 2025 and beyond (Deloitte Consulting, Hrsg.). Verfügbar unter <https://www2.deloitte.com/content/dam/Deloitte/us/Documents/consumer-business/us-auto-the-future-of-the-automotive-value-chain.pdf>.
- Henning, H.-M. & Palzer, A. (2013). Energiesystem Deutschland 2050. Sektor- und Energieträgerübergreifende, modellbasierte, ganzheitliche Untersuchung zur

- langfristigen Reduktion energiebedingter CO<sub>2</sub>-Emissionen durch Energieeffizienz und den Einsatz Erneuerbarer Energien. Freiburg im Breisgau: Fraunhofer-Institut für solare Energiesysteme (Fraunhofer ISE).
- Henning, H.-M. & Palzer, A. (2015). Was kostet die Energiewende? Wege zur Transformation des deutschen Energiesystems bis 2050. Freiburg: Fraunhofer-Institut für solare Energiesysteme (Fraunhofer ISE).
- Hermann, H.; Loreck, C.; Ritter, D.; Greiner, B.; Keimeyer, F.; Cook, V.; Bartelt, N.; Bittner, M.; Nailis, D. & Klinski (2017). Klimaschutz im Stromsektor 2030 - Vergleich von Instrumenten zur Emissionsminderung (Umweltbundesamt (UBA), Hrsg.) (Climate Change 02/2017). Verfügbar unter [https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/1/publikationen/2017-01-11\\_cc\\_02-2017\\_strommarkt\\_endbericht.pdf](https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/1/publikationen/2017-01-11_cc_02-2017_strommarkt_endbericht.pdf), zuletzt abgerufen am 19.01.2017.
- Hesse, T. (2016, Februar). Transforming the German building stock into a climate-neutral state by 2050. A stock modelling approach, Wels, zuletzt abgerufen am 07.03.2016.
- Hessisches Ministerium des Innern und für Sport (2017): Für Hessen Unterwegs. Landesticket. Ab dem 1. Januar 2018 fahren 145.000 Landesbedienstete kostenlos im ÖPNV. Online verfügbar unter: <https://innen.hessen.de/buergerstaat/personalwesen/landesticket>, zuletzt geprüft am 31.05.18.
- Hildebrand, J.; Rau, I. & Schweizer-Ries, P. (2012). Die Bedeutung dezentraler Beteiligungsprozesse für die Akzeptanz des Ausbaus erneuerbarer Energien. Informationen zur Raumentwicklung 10 (9).
- Hirschl, B.; Aretz, A.; Prah, A.; Böther, T.; Heinbach, K.; Pick, D. & Funcke, S. (2010). Kommunale Wertschöpfung durch Erneuerbare Energien (Schriftenreihe des IÖW 196/10), Berlin.
- Hirschl, B.; Gährs, S. & Aretz, A. (2016). Rolle und Potenziale von Prosumer-Haushalten in der neuen Energiewelt. Erkenntnisse aus den Projekten „Prosumer-Haushalte“ und „PV-Nutzen“. Berlin: Institut für ökologische Wirtschaftsforschung (IÖW), zuletzt abgerufen am 09.07.2018.
- Holstein, Joachim (2017): Europa braucht mehr Nachtzüge. Online verfügbar unter: <https://www.nachtzug-bleibt.eu/>, zuletzt geprüft am 24.05.2018.
- Huber, M.; Dimkova, D. & Hamacher, T. (2014). Integration of wind and solar power in Europe: Assessment of flexibility requirements. Energy (69), S. 236–246.
- Huppertz, S. (enorm Magazin, Hrsg.) (2017). Schluss für Diesel und Benzin. Ab dem Jahr 2050 will Frankreich emissionsfrei sein. Eine wichtige Rolle spielt dabei das Verbot von Diesel- und Benzinmotoren ab 2040. Verfügbar unter <https://enorm-magazin.de/schluss-fuer-diesel-und-benzin>, zuletzt abgerufen am 19.03.2018.
- IG BCE (2018). Klima schützen – Standort stärken. Musterpräsentation. Verfügbar unter <https://www.igbce.de/vanity/renderDownloadLink/348/167968>.
- Institut für Energie- und Umweltforschung (IFEU); adelphi consult; PriceWaterhouseCoopers; Ecofys Germany; Agentur für Erneuerbare Energien (AEE) & Deutsche Energie Agentur (dena) (2017). Wärmenetzsysteme 4.0. Kurzstudie zur Umsetzung der Maßnahme „Modellvorhaben erneuerbare Energien in hoch-effizienten Niedertemperaturwarmnetzen“. Endbericht, zuletzt abgerufen am 20.02.2018.
- Institut für ZukunftsEnergieSysteme (IZES) (2014). Beitrag der Bioenergie zur Energiewende. Freising: Fachverband Biogas, zuletzt abgerufen am 15.12.2015.
- International Council on Clean Transportation (ICCT) (2017). The European commission’s renewable energy proposal for 2030 (POLICY UPDATE January 2017).

- Internationaler Verein zur Förderung der Gemeinwohl-Ökonomie (2018): Vision. Online verfügbar unter: <https://www.ecogood.org/de/vision/>, zuletzt geprüft am 24.05.2018.
- ISEA RWTH Aachen (2016). Wissenschaftliches Mess- und Evaluierungsprogramm Solarstromspeicher. Aachen: ISEA RWTH Aachen.
- IWU; BEI; Diefenbach, N.; Cischinsky, H.; Rodenfels, M. & Clausnitzer, K.-D. (2010). Datenbasis Gebäudebestand. Datenerhebung zur energetischen Qualität und zu den Modernisierungstrends im deutschen Wohngebäudebestand (Institut für Wohnen und Umwelt & Berliner Energie Institut, Hrsg.).
- Jagnow, K. & Wolff, D. (2011). Nah- und Fernwärme: Aus- oder Rückbau? Zukünftige Wärmeversorgung von Gebäuden (TGA Fachplaner 09/2011), zuletzt abgerufen am 20.02.2018.
- Jochum, P.; Lempik, J.; Böttcher, S.; Stelter, D.; Krenz, T.; Mellwig, P.; Pehnt, M.; Oehsen, A. v.; Blömer, S. & Hertle, H. (2017). Ableitung eines Korridors für den Ausbau der erneuerbaren Wärme im Gebäudebereich. Anlagenpotenzial. Berlin Heidelberg: Beuth Hochschule für Technik; Institut für Energie- und Umweltforschung (IFEU), zuletzt abgerufen am 07.07.2017.
- Jochum, P. & Mellwig, P. (2014). Grenzen der Dämmung opaker Bauteile. Bauphysik 36 (6), S. 289–297.
- juwi & Reiner Lemoine Institut (RLI) (2015). Die Rolle von Power-to-Gas in der zukünftigen Stromversorgung. Das optimierte Stromversorgungssystem bei hohen Anteilen Erneuerbarer Energien am Beispiel der Modellregion Trier-Amprion 5 (BMWl, Hrsg.), Berlin.
- Kasten, P. (2017). Power-to-X Strombasierte Kraftstoffe als Klimaschutzoption im Güterverkehr? Vortrag im Rahmen der Konferenz „Von CO<sub>2</sub>-Grenzwerten bis zur Oberleitung: Wohin steuert der klimafreundliche Lkw?“, Berlin. Verfügbar unter <https://www.oeko.de/fileadmin/oekodoc/nabu-lkw-konferenz-vortrag-peter-kasten.pdf>, zuletzt abgerufen am 08.03.2018.
- Kasten, P.; Blanck, R.; Loreck, C. & Hacker, F. (2013). Strombasierte Kraftstoffe im Vergleich – Stand heute und die Langfristperspektive. Aktualisierte Fassung. Öko-Institut Working Paper 1/2013. Berlin: Öko-Institut.
- Kasten, P.; Mottschall, M.; Köppel, W.; Degünther, C.; Schmied, M. & Wüthrich, P. (2016). Erarbeitung einer fachlichen Strategie zur Energieversorgung des Verkehrs bis zum Jahr 2050. Studie im Auftrag des Umweltbundesamtes (Umweltbundesamt, Hrsg.), Dessau-Roßlau.
- Kemfert, Claudia (2017): Umsteuern erforderlich: Klimaschutz im Verkehrssektor. Hg. v. Deutsches Institut für Wirtschaftsforschung (DIW Berlin). Online verfügbar unter: [https://www.diw.de/de/diw\\_01.c.571558.de/presse/diw\\_aktuell/umsteuern\\_erfordern\\_klimaschutz\\_im\\_verkehrssektor.html](https://www.diw.de/de/diw_01.c.571558.de/presse/diw_aktuell/umsteuern_erfordern_klimaschutz_im_verkehrssektor.html), zuletzt geprüft am 24.05.2018.
- Kinthaert, L. (2017). What Will Power Shipping in 2050?, KNect365. Verfügbar unter <https://knect365.com/maritime/article/ad2c7853-2d17-4d19-b6ac-e3104187c528/what-fuel-will-the-shipping-industry-use-in-2050>, zuletzt abgerufen am 01.03.2018.
- Klein, S.; Steinert, T.; Fricke, A. & Peschel, D. (2017). Erneuerbare Gase - ein Systemupdate der Energiewende (enervis energy advisors (enervis), Hrsg.), Berlin, zuletzt abgerufen am 13.12.2017.
- KlimaAktiv (2018): CO<sub>2</sub> Rechner. Klimaneutral leben: Die CO<sub>2</sub>-Bilanz im Blick. Online verfügbar unter: [http://www.uba.co2-rechner.de/de\\_DE/](http://www.uba.co2-rechner.de/de_DE/), zuletzt geprüft am 31.05.2018.

- Koch, M.; Hesse, T.; Kenkmann, T.; Bürger, V.; Haller, M.; Heinemann, C.; Vogel, M.; Bauknecht, D.; Flachsbarth, F.; Winger, C.; Wimmer, D. O.; Rausch, L.; Hermann, H.; Stieß, I.; Birzler-Harder, B.; Kunkis, M. & Tambke, J. (2017). Einbindung des Wärme- und Kältesektors in das Strommarktmodell PowerFlex zur Analyse sektorübergreifender Effekte auf Klimaschutzziele und EE-Integration. Freiburg: Öko-Institut; Institut für sozial-ökologische Forschung (ISOE); ForWind - Zentrum für Windenergieforschung. Verfügbar unter <https://www.oeko.de/fileadmin/oekodoc/Einbindung-Waerme-Kaeltesektor-Powerflex.pdf>, zuletzt abgerufen am 14.09.2017.
- Kraftfahrtbundesamt (2018): Pressemitteilung Nr. 6/2018 – Der Fahrzeugbestand am 1. Januar 2018. Online verfügbar unter: [https://www.kba.de/DE/Presse/Pressemitteilungen/2018/Fahrzeugbestand/pm6\\_fz\\_bestand\\_pm\\_komplett.html](https://www.kba.de/DE/Presse/Pressemitteilungen/2018/Fahrzeugbestand/pm6_fz_bestand_pm_komplett.html), zuletzt geprüft am 31.05.2018.
- Kreditanstalt für Wiederaufbau (2016). Erneuerbare Energien – Speicher (275), Kreditanstalt für Wiederaufbau. Verfügbar unter [https://www.kfw.de/inlandsfoerderung/Unternehmen/Energie-Umwelt/F%C3%B6rderprodukte/Erneuerbare-Energien-%E2%80%93-Speicher-\(275\)/](https://www.kfw.de/inlandsfoerderung/Unternehmen/Energie-Umwelt/F%C3%B6rderprodukte/Erneuerbare-Energien-%E2%80%93-Speicher-(275)/), zuletzt abgerufen am 14.09.2016.
- Krempel, S. (heise online, Hrsg.) (2017). Niederlande: Ab 2030 sollen nur noch emissionsfreie Pkw auf die Straße. Verfügbar unter <https://www.heise.de/newsticker/meldung/Niederlande-Ab-2030-sollen-nur-noch-emissionsfreie-Pkw-auf-die-Strasse-3858413.html>, zuletzt abgerufen am 19.03.2017.
- Kreyenberg, D.; Lischke, A.; Bergk, F.; Duennenbeil, F.; Heidt, C.; Knörr, W.; Raksha, T.; Schmidt, P.; Weindorf, W.; Naumann, K.; Majer, S. & Müller-Langer, F. (2015). Erneuerbare Energien im Verkehr. Potenziale und Entwicklungsperspektiven verschiedener erneuerbarer Energieträger und Energieverbrauch der Verkehrsträger. Berlin: Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR); Institut für Energie- und Umweltforschung (IFEU); Ludwig-Bölkow-Systemtechnik; Deutsches Biomasseforschungszentrum (DBFZ), zuletzt abgerufen am 27.10.2016.
- Kühne, J. (2016, April). Power-to-(District)Heat – Kraft-Wärme-Kopplung anders betrachtet. Berliner Energietage 2016, Berlin. Verfügbar unter <https://www.agora-energiewende.de/de/themen/-agothem-/Produkt/produkt/274/Wie+verschmelzen+Strom+und+W%C3%A4rmesektor%3F/>.
- Kühne, O. (2015). Landschaft und Netzausbau - zwischen Heimatempfinden und ästhetischen Erwartungen (Deutsche Umwelthilfe (DUH), Hrsg.). Berlin: Hochschule Weihenstephan-Triesdorf, zuletzt abgerufen am 19.09.2017.
- Landtag von Baden-Württemberg: Landesplanungsgesetz Baden-Württemberg , abgerufen am 25.04.2018.
- Lanzendorf, Martin; Busch-Geertsema, Annika (2014): The Cycling Boom in Large German cities? Empirical Evidence for Successful Cycling Campaigns. In: Transport Policy 36, S. 26-33.
- LBD Beratungsgesellschaft (2015). Die Rolle der Kraft- Wärme-Kopplung in der Energiewende. Studie im Auftrag von Agora Energiewende (Agora Energiewende, Hrsg.), zuletzt abgerufen am 15.02.2018.
- Lorenz, Olga (2018): Does commuting matter to subjective well-being? In: Journal of Transport Geography 66, S. 180-199.
- Maaß, C.; Sandrock, M. & Schaeffer, R. (2015). Fernwärme 3.0. Strategien für eine zukunftsorientierte Fernwärmepolitik. Studie im Auftrag der Bundestagsfraktion Bündnis 90 / Die Grünen, zuletzt abgerufen am 14.02.2018.

- Marques, R. ; Hernandez-Herrador, V. ; Calvo-Salazar, M. ; Garcia-Cebrian, J.A. (2015): How Infrastructure Can Promote Cycling in Cities: Lessons from Seville. In: Research in Transportation Economics 53, S. 31-44.
- Martin, Elliot; Shaheen, Susan A.; Lidicker, Jeffrey (2010): Impact of Carsharing on Household Vehicle Holdings. In: Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board 2143 (1), S. 150–158.
- Matthes, F. C.; Emele, L.; Hermann, H.; Loreck, C.; Peter, F.; Ziegenhagen, I. & Cook, V. (2017). Zukunft Stromsystem - Kohleausstieg 2035. Vom Ziel her denken. Studie für WWF Deutschland. Berlin: Öko-Institut; Prognos. Verfügbar unter <https://www.oeko.de/fileadmin/oekodoc/Stromsystem-Kohleausstieg-2035.pdf>, zuletzt abgerufen am 19.01.2017.
- Matthes, F. C.; Flachsbarth, F. & et al. (2018). Arbeitspapier Stromsystem 2035. Unveröffentlicht und in Bearbeitung (WWF Deutschland, Hrsg.). Berlin: Öko-Institut; Prognos.
- Ministerium für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft Baden Württemberg (2018). Windenergie. Verfügbar unter <https://um.baden-wuerttemberg.de/de/energie/erneuerbare-energien/windenergie/>, zuletzt abgerufen am 25.04.2018.
- Missal, P. (2014). Power-to-Gas: Wirtschaftlichkeitsbetrachtung und Sensitivitätsanalyse. Alzey: e-rp, zuletzt abgerufen am 09.02.2017.
- Mohrhauer, T. (2016). Comparison of Nodal, Zonal and Hybrid Market Structures with Respect to Operating Cost and Redispatch Volumes. Zürich: ETH-Zürich, zuletzt abgerufen am 17.01.2018.
- Monheim, Heiner; Muschwitz, Christian; Reimann, Johannes; Thesen, Volker; Grade, Anja; Kritzinger, Stephan; Rikus, Simon; Leckel, Saskia; Gutberlet, Theresa (2016): Grundlagenuntersuchung zur Situation des Radverkehrs in Deutschland. Kurzdarstellung der Forschungsergebnisse. Hg. v. Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur; TÜV Rheinland Consulting; raumkom; Prognos. Online verfügbar unter: [http://mobilitaet21.de/wp-content/uploads/2018/02/700895\\_GrundlagenuntersuchungRadverkehr\\_Kurzdarstellung.pdf](http://mobilitaet21.de/wp-content/uploads/2018/02/700895_GrundlagenuntersuchungRadverkehr_Kurzdarstellung.pdf), zuletzt geprüft am 31.05.18.
- Mono, R.; Glasstetter, P. & Horn, F. (2014). Ungleichzeitigkeit und Effekte räumlicher Verteilung von Wind und Solarenergie in Deutschland (100 Prozent erneuerbar stiftung, Hrsg.), Berlin. Verfügbar unter <http://100-prozent-erneuerbar.de/wp-content/uploads/2014/04/Ungleichzeitigkeit-und-Effekte-r%C3%A4umlicher-Verteilung-von-Wind-und-Solarenergie-in-Deutschland.pdf>, zuletzt abgerufen am 09.06.2015.
- Moshövel, J.; Magnor, D.; Sauer, D. U.; Gähns, S.; Bost, M.; Hirschl, B.; Cramer, M.; Özalay, B.; Matrose, C.; Müller, C. & Schnettler, A. (2015). Analyse des wirtschaftlichen, technischen und ökologischen Nutzens von PV-Speichern. Gemeinsamer Endbericht für das Projekt PV-Nutzen (Bundesminister für Wirtschaft und Energie (BMWI), Hrsg.). Berlin: ISEA RWTH Aachen; IFHT RWTH Aachen; Institut für ökologische Wirtschaftsforschung (IÖW), zuletzt abgerufen am 09.07.2018.
- NABU (2017). Pläne für Kohleausstieg liegen auf dem Tisch: Alle Zeichen stehen auf Kohleausstieg. Politik hinkt hinterher. Verfügbar unter <https://www.nabu.de/umwelt-und-ressourcen/energie/fossile-energien/stein-und-braunkohle/22274.html>, zuletzt abgerufen am 20.04.2018.
- NABU – Naturschutzbund Deutschland (2017): Straßen entlasten: Bausteine für umweltfreundlichen Güterverkehr. Online verfügbar unter:

<https://www.nabu.de/umwelt-und-ressourcen/verkehr/strassenverkehr/queterverkehr.html>, zuletzt geprüft am 24.05.2018.

- Nachtgiger (2016): Der Nachtzug muss bleiben. Online verfügbar unter: [http://www.nachtzug-retten.de/?page\\_id=43](http://www.nachtzug-retten.de/?page_id=43), zuletzt geprüft am 24.05.2018.
- N-ERGIE Aktiengesellschaft (2016). Dezentralität und zellulare Optimierung. Auswirkungen auf den Netzausbaubedarf. Berlin: N-ERGIE Aktiengesellschaft, zuletzt abgerufen am 13.04.2017.
- NEXT Kraftwerke (2015). Flexibilität am Strommarkt – Erneuerbare regeln das selbst. NEXT Kraftwerke. Verfügbar unter <https://www.next-kraftwerke.de/energie-blog/flexibilitaet-strommarkt>, zuletzt abgerufen am 02.10.2017.
- Nie, Peng; Sousa-Poza, Alfonso (2018): Commute time and subjective well-being in urban China. In: China Economic Review 48, S. 188-204.
- Nitsch, J. (2016). Die Energiewende nach COP 21 – Aktuelle Szenarien der deutschen Energieversorgung. Kurzstudie für den Bundesverband Erneuerbare Energien, zuletzt abgerufen am 13.01.2018.
- Nitsch, J.; Pregger, T.; Naegler, T.; Heide, D.; de Tena, Diego Luca; Trieb, F.; Scholz, Y.; Nienhaus, K.; Gerhardt, N.; Sterner, M.; Trost, T.; Oehsen, A. v.; Schwinn, R.; Pape, C.; Hahn, H.; Wickert, M. & Wenzel, B. (2011). Langfristszenarien und Strategien für den Ausbau der erneuerbaren Energien in Deutschland bei Berücksichtigung der Entwicklung in Europa und global (Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU), Hrsg.). Berlin: Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR); Fraunhofer Institut für Windenergie und Energiesystemtechnik (Fraunhofer IWES); IfnE, zuletzt abgerufen am 14.03.2017.
- Ockenfels, A.; Grimm, V. & Zoettl, G. (2008). Strommarktdesign - Preisbildungsmechanismus im Auktionsverfahren für Stromstundenkontrakte an der EEX.
- Öko-Institut (2014). Prüfung der klimapolitischen Konsistenz und der Kosten von Methanisierungsstrategien, Berlin. Verfügbar unter <https://www.oeko.de/oekodoc/2005/2014-021-de.pdf>, zuletzt abgerufen am 19.12.2016.
- Öko-Institut (2016). Die Gesamtkosten regenerativer Stromsysteme im Vergleich, Berlin.
- Öko-Institut (2017). Erneuerbare vs. fossile Stromsysteme: ein Kostenvergleich (Agora Energiewende, Hrsg.), Berlin, zuletzt abgerufen am 16.01.2017.
- Öko-Institut & Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung (Fraunhofer ISI) (2015a). Klimaschutzszenario 2050 – 2. Endbericht. 2. Modellierungsrunde, Berlin.
- Öko-Institut & Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung (Fraunhofer ISI) (2015b). Klimaschutzszenario 2050 - Zusammenfassung des 2. Endberichts (Bundesministerium für Umwelt Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit (BMUB), Hrsg.), Berlin.
- Öko-Institut & Offis (2016). Dezentral und zentral gesteuertes Energiemanagement auf Verteilnetzebene zur Systemintegration erneuerbarer Energien, Freiburg.
- Ohnmacht, Timo, Maksim, Hanja, Bergman, Manfred Max (2009): Mobilities and inequality. Farnham, England: Ashgate Pub. Co.
- Oliveira, Rodrido; Moura, Klebson; Viana, Jorge, Tigre, Robson; Sampaio, Breno (2015): Commute duration and health: Empirical evidence from Brazil. In: Transport Research A: Policy and Practice, S. 62-75.

- Oschatz, B.; Winiewska, B.; Mailach, B. & Pfnür, A. (2016). Dezentrale vs. zentrale Wärmeversorgung im deutschen Wärmemarkt. Vergleichende Studie aus energetischer und ökonomischer Sicht, zuletzt abgerufen am 14.02.2018.
- Paar, A.; Herbert, F.; Pehnt, M.; Ochse, S.; Richter, S.; Maier, S.; Huther, H.; Kühne, J. & Weidlich, I. (2013). Transformationsstrategien von fossiler zentraler Fernwärmeversorgung zu Netzen mit höheren Anteilen erneuerbarer Energien (Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU), Hrsg.). Institut für Energie- und Umweltforschung (IFEU); GEF Ingenieur; Der Energieeffizienzverband für Wärme, Kälte und KWK (AGFW), zuletzt abgerufen am 18.11.2015.
- Perner, J. (2018). Die zukünftigen Kosten strombasierter synthetischer Brennstoffe: (Agora Verkehrswende, Agora Energiewende & Frontier Economics, Hrsg.). Berlin: Agora Verkehrswende; Agora Energiewende; Frontier Economics.
- Peter, S. (2013). Modellierung einer vollständig auf erneuerbaren Energien basierenden Stromerzeugung im Jahr 2050 in autarken, dezentralen Strukturen (Umweltbundesamt (UBA), Hrsg.), Dessau-Roßlau.
- Pfeiffer, M. (2012, Juni). Energieeffizienz und Klimaschutz im Luftverkehr - Was haben wir erreicht, was ist noch zu tun?, Berlin.
- Pfennig, M.; Gerhardt, N.; Pape, C. & Böttger, D. (2017). Mittel- und Langfristige Potenziale von PtL und H2-Importen aus internationalen EE-Vorzugsregionen. Teilbericht im Rahmen des Projektes: KLIMAWIRKSAMKEIT ELEKTROMOBILITÄT - Entwicklungsoptionen des Straßenverkehrs unter Berücksichtigung der Rückkopplung des Energieversorgungssystems in Hinblick auf mittel- und langfristige Klimaziele. Kassel: Fraunhofer Institut für Windenergie und Energiesystemtechnik (IWES).
- Pistoll, Chance; Goodman, Anna (2014): The Link between Socioeconomic Position, Access to Cycling Infrastructure and Cycling Participation Rates: An Ecological Study in Melbourne, Australia. In: Journal of Transport and Health 1(4): 251-259.
- Prognos (2013). Maßnahmen zur nachhaltigen Integration von Systemen zur gekoppelten Strom- und Wärmebereitstellung in das neue Energieversorgungssystem. Berlin: Prognos, zuletzt abgerufen am 26.01.2015.
- Randelhoff, Martin (2013): Die Finanzierung des öffentlichen Verkehrs in Deutschland: Struktur, Probleme und Alternativen. Online verfügbar unter: <https://www.zukunft-mobilitaet.net/28179/analyse/finanzierung-des-oePNV-in-deutschland/>, zuletzt geprüft am 31.05.18.
- Reh, Werner; Breidenbach, Helmut; Jäcker-Cüppers, Michael; Lege, Monika; Mahler, Alexander; Müller-Görnert, Michael; Zimmermann, Annegret; Mergner, Richard; Schreiber, Alfred; Treudt, Günter (2015): NGO-Luftverkehrskonzept. Schritte zu einem zukunftsfähigen und umweltverträglichen Luftverkehr in Deutschland. Hg. v. Bund für Umwelt und Naturschutz Deutschland (BUND); Brot für die Welt – Evangelischer Entwicklungsdienst, Evangelisches Werk für Diakonie und Entwicklung; Bundesvereinigung gegen Fluglärm (BVF) ; Deutscher Naturschutzring, Dachverband der deutschen Natur-, Tier- und Umweltschutzorganisationen (DNR); Forum Ökologisch-Soziale Marktwirtschaft (FÖS); Klima-Allianz Deutschland; ROBIN WOOD; Verkehrsclub Deutschland (VCD). Online verfügbar unter: [https://www.vcd.org/fileadmin/user\\_upload/Redaktion/Themen/Flugverkehr/NGO\\_Luftverkehrskonzept\\_7-2015.pdf](https://www.vcd.org/fileadmin/user_upload/Redaktion/Themen/Flugverkehr/NGO_Luftverkehrskonzept_7-2015.pdf), zuletzt geprüft am 24.05.2018.
- Reiner Lemoine Institut (RLI) (2017). Smart Power Flow. Optimierung der Netzerweiterung versus Energiespeicher auf der Verteilnetzebene infolge zunehmender

- regenerativer Leistungsflüsse. Berlin: Reiner Lemoine Institut (RLI), zuletzt abgerufen am 20.09.2017.
- Reiner Lemoine Institut (RLI) & Bundesverband Erneuerbare Energie (BEE) (2013). Vergleich und Optimierung von zentral und dezentral orientierten Ausbaupfaden zu einer Stromversorgung aus Erneuerbaren Energien in Deutschland. Studie im Auftrag von Haleakala-Stiftung, 100 Prozent erneuerbar stiftung, Bundesverband mittelständische Wirtschaft (BVMW). Berlin: Reiner Lemoine Institut (RLI). Verfügbar unter [http://reiner-lemoine-institut.de/wp-content/publications/0\\_Vergleich\\_und\\_Optimierung\\_zentral\\_und\\_dezentral\\_071\\_100EE/Breyer2013.pdf](http://reiner-lemoine-institut.de/wp-content/publications/0_Vergleich_und_Optimierung_zentral_und_dezentral_071_100EE/Breyer2013.pdf), zuletzt abgerufen am 05.02.2018.
- Repenning, J.; Emele, L.; Blanck, R.; Dehoust, G.; Förster, H.; Greiner, B.; Harthan, R.; Henneberg, K.; Hermann, H.; Jörß, W.; Ludig, S.; Loreck, C.; Scheffler, M.; Schumacher, K.; Wiegmann, K.; Zell-Ziegler, C.; Braungardt, S.; Eichhammer, W.; Elsland, R.; Fleiter, T.; Hartwig, J.; Kockat, J.; Pfluger, B.; Schade, W.; Schlomann, B. & Sensfuß, F. (2015a). Klimaschutzscenario 2050. 2. Modellierungsrunde. Studie im Auftrag des Bundesministeriums für Umweltschutz, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit. Öko-Institut; Fraunhofer ISI.
- Repenning, J.; Hermann, H.; Emele, L.; Jörß, W.; Blanck, R.; Loreck, C.; Böttcher, H.; Ludig, S.; Dehoust, G. & Matthes, Felix Chr. et al. (2015b). Klimaschutzscenario 2050. 2. Modellierungsrunde (Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit (BMUB), Hrsg.). Berlin: Öko-Institut; Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung (Fraunhofer ISI). Verfügbar unter <https://www.oeko.de/oekodoc/2451/2015-608-de.pdf>, zuletzt abgerufen am 15.05.2017.
- Rissel, Chris; Greaves, Stephen; Wen, Li Ming; Crane, Melanie; Standen, Chris (2015): Use of and Short-Term Impacts of New Cycling Infrastructure in Inner-Sydney, Australia: A Quasi-Experimental Design. In: International Journal of Behavioral Nutrition and Physical Activity 12(1), S. 12-129.
- Rudolph, F.; Koska, T. & Schneider, C. (2017). Verkehrswende für Deutschland. Der Weg zu CO2-freier Mobilität bis 2035 (Greenpeace, Hrsg.). Hamburg, Wuppertal: Wuppertal Institut für Klima, Umwelt, Energie. Verfügbar unter [https://wupperinst.org/fa/redaktion/downloads/projects/Mobilitaetsszenario\\_2035\\_Langfassung.pdf](https://wupperinst.org/fa/redaktion/downloads/projects/Mobilitaetsszenario_2035_Langfassung.pdf), zuletzt abgerufen am 08.03.2018.
- Rüger, Heiko; Pfaff, Simon; Weishaar, Heide ; Wiernik, Brenton M. (2017): Does perceived stress mediate the relationship between commuting and health-related quality of life? In: Transportation Research Part F. Traffic Psychology and Behaviour 50, S. 100-108.
- Sachverständigenrat für Umweltfragen (SRU) (2011). Wege zur 100% erneuerbaren Stromversorgung. Sondergutachten, Berlin. Verfügbar unter [https://www.umweltrat.de/SharedDocs/Downloads/DE/02\\_Sondergutachten/2011\\_07\\_SG\\_Wege\\_zur\\_100\\_Prozent\\_erneuerbaren\\_Stromversorgung.pdf;jsessionid=D4B0FD531F65AE3279BF5ACA2DFA2EC0.1\\_cid284?\\_blob=publicationFile&v=12](https://www.umweltrat.de/SharedDocs/Downloads/DE/02_Sondergutachten/2011_07_SG_Wege_zur_100_Prozent_erneuerbaren_Stromversorgung.pdf;jsessionid=D4B0FD531F65AE3279BF5ACA2DFA2EC0.1_cid284?_blob=publicationFile&v=12), zuletzt abgerufen am 05.03.2011.
- Sachverständigenrat für Umweltfragen (SRU) (2017). Kohleausstieg jetzt einleiten. Stellungnahme, Berlin.
- Schaber, K. & Bieberbach, F. (2015). Redispatch und dezentrale Erzeugung. Alternativen zum Netzausbau? Energiewirtschaftliche Tagesfragen 65 (7), S. 18–23.
- Scheepers, C. E.; Wendel-Vos, G.C.W.; den Bröder, J. M.; van Kempen, E.E.M.M.; van Wesemael, P.J.V.; Schuit, A.J. (2014): Shifting from Car to Active Transport:

- A Systematic Review of the Effectiveness of Interventions'. In: Transportation Research Part A: Policy and Practice 70, S. 264-280.
- Schlesinger, M.; Hofer, P.; Kemmler, A.; Kirchner, A.; Koziel, S.; Ley, A.; Piégsa, A.; Seefeldt, F.; Straßburg, S.; Weinert, K.; Lindenberger, D.; Knaut, A.; Malischek, R.; Nick, S.; Panke, T.; Paulus, S.; Tode, C.; Wagner, J.; Lutz, C.; Lehr, U. & Ulrich, P. (2014b). Entwicklung der Energiemärkte - Energiereferenzprognose. Endbericht Projekt Nr. 57/12. Studie im Auftrag des Bundesministeriums für Wirtschaft und Technologie. Basel, Köln, Osnabrück: Prognos; Energiewirtschaftliches Institut an der Universität zu Köln; Gesellschaft für Wirtschaftliche Struktur-forschung.
- Schmied, M.; Wüthrich, P.; Zah, R.; Althaus, H.-J. & Friedl, C. (2014). Postfossile Energieversorgungsoptionen für einen treibhausgasneutralen Verkehr im Jahr 2050: Eine verkehrsträgerübergreifende Bewertung (Umweltbundesamt, Hrsg.) (Texte 20/2015). Dessau-Roßlau: INFRAS; Quantis.
- Schneller, A.; Frank, L. & Töper, K. (a.) (2017). Wärmenetze 4.0 im Kontext der Wärmewende. Analyse der Regelungs- und Förderlandschaft innovativer Wärmenetzsysteme, zuletzt abgerufen am 19.01.2018.
- Schubert, M.; Kluth, T.; Nebauer, G.; Ratzenberger, R.; Kotzagiorgis, S.; Butz, B.; Schneider, W. & Leible, M. (2014). Verkehrsverflechtungsprognose 2030. Schlussbericht. Los 3: Erstellung der Prognose der deutschlandweiten Verkehrsverflechtungen unter Berücksichtigung des Luftverkehrs (Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur (BMVI), Hrsg.). Freiburg, München, Aachen, Essen: Intraplan Consult; Beratergruppe Verkehr + Umwelt; Ingenieurgruppe IVV; Planco Consulting.
- Schwarzer, Christoph M. (2014): Die subventionierte Umweltsau. Hg. v. Zeit Online. Online verfügbar unter: <https://www.zeit.de/mobilitaet/2014-06/luftfahrt-subventionen-flugzeug>, zuletzt geprüft am 24.05.2018.
- Senatsverwaltung für Umwelt, Verkehr und Klimaschutz (2018): Berliner Mobilitätsgesetz. Online verfügbar unter: <https://www.berlin.de/senuvk/verkehr/mobilitaetsgesetz/>, zuletzt geprüft am: 24.05.2018
- Sensfuß, F. (2011). Analysen zum Merit-Order Effekt erneuerbarer Energien. Update für das Jahr 2010. Karlsruhe: Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung (Fraunhofer ISI), zuletzt abgerufen am 27.10.2014.
- Sensfuß, F.; Deac, G. & Bernath, C. (2017). Vorabanalyse Langfristige Rolle und Modernisierung der Kraft-Wärme-Kopplung. Kurzpapier (Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung (Fraunhofer ISI), Hrsg.), Karlsruhe, zuletzt abgerufen am 15.02.2018.
- Shell Deutschland Oil (2017). Shell plant zusammen mit ITM Power industrielle Produktion von Wasserstoff durch Elektrolyse. Verfügbar unter <https://www.shell.de/medien/shell-presseinformationen/2017/shell-plant-zusammen-mit-itm-power-industrielle-produktion-von-wasserstoff-durch-elektrolyse.html>, zuletzt abgerufen am 01.03.2018.
- Shoup, Donald (2017): High Cost of Free Parking. London: Taylor and Francis.
- Sieberg, U.; Koch, M. & Uphoff, H. et.al. (2016). Effizient Erneuerbar. Was jetzt zum Gelingen einer Erneuerbaren Wärmewende getan werden muss. BEE-Positionspapier: Analyse des Wärmemarktes und Eckpunkte einer Wärme- & Kältestrategie (Bundesverband Erneuerbare Energie (BEE), Hrsg.), Berlin, zuletzt abgerufen am 11.10.2017.

- Siegemund, S.; Trommler, M.; Kolb, O.; Zinnecker, V.; Schmidt, P.; Weindorf, W.; Zittel, W.; Raksha, T. & Zerhusen, J. (2017). E-Fuels Study: The potential of electricity-based fuels for low-emission transport in the EU. An expertise by LBST and dena (Deutsche Energie Agentur (dena), Hrsg.). Berlin: Deutsche Energie Agentur (dena); Ludwig-Bölkow-Systemtechnik.
- Smart Grids-Plattform Baden-Württemberg (2017). C/sells-Community \_ Das Magazin. In Süddeutschland nimmt die Energiewende Form an. Stuttgart: Smart Grids-Plattform Baden-Württemberg, zuletzt abgerufen am 07.06.2018.
- Song, Yena; Preston, John; Ogilvie, David (2017): New Walking and Cycling Infrastructure and Modal Shift in the UK: A Quasi-Experimental Panel Study. In: Transportation Research Part A: Policy and Practice 95 (January), S. 320-333.
- Spath, D.; Bauer, W.; Voigt, S.; Borrmann, D.; Herrmann, F.; Brand, M.; Rally, P.; Rothfuss, F.; Sachs, C.; Frieske, B.; Propfe, B.; Redelbach, M.; Schmid, S. & Dispan, J. (2012). Elektromobilität und Beschäftigung. Wirkungen der Elektrifizierung des Antriebsstrangs auf Beschäftigung und Standortumgebung (ELAB) (Fraunhofer-Institut für Arbeitswirtschaft und Organisation, Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt - Institut für Fahrzeugkonzepte & IMU Institut, Hrsg.), Stuttgart. Verfügbar unter <https://www.muse.iao.fraunhofer.de/content/dam/iao/muse/de/documents/AbgeschlosseneProjekte/elab-abschlussbericht.pdf>.
- SPD (2017). Zeit für mehr Gerechtigkeit. Unser Regierungsprogramm für Deutschland. (Wahlprogramm), zuletzt abgerufen am 15.02.2018.
- Statista (2018): Umsatz durch E-Commerce (B2C) in Deutschland in den Jahren 1999 bis 2017 sowie eine Prognose für 2018 (in Milliarden Euro). Online verfügbar unter: <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/3979/umfrage/e-commerce-umsatz-in-deutschland-seit-1999/>, zuletzt geprüft am 24.05.2018.
- Statistisches Bundesamt (2017): Güter- und Personenverkehr. Online verfügbar unter: [https://www.destatis.de/DE/ZahlenFakten/Wirtschaftsbereiche/TransportVerkehr/\\_Grafik/Schiebebuehne\\_GueterPersonenverkehr.png;jsessionid=FFE9DAF4DF3BF4C57E43F15F06384DAF.InternetLive?blob=poster](https://www.destatis.de/DE/ZahlenFakten/Wirtschaftsbereiche/TransportVerkehr/_Grafik/Schiebebuehne_GueterPersonenverkehr.png;jsessionid=FFE9DAF4DF3BF4C57E43F15F06384DAF.InternetLive?blob=poster), zuletzt geprüft am 24.05.2018.
- Stephanos, C.; Höhne, M.-C. & et al. (2017). »Sektorkopplung« – Optionen für die nächste Phase der Energiewende. Stellungnahme (Deutsche Akademie der Technikwissenschaften (acatech), Deutsche Akademie der Naturforscher Leopoldina & Union der deutschen Akademien der Wissenschaften (Hrsg.), München. Verfügbar unter [http://energiesysteme-zukunft.de/fileadmin/user\\_upload/Publikationen/pdf/ESYS\\_Stellungnahme\\_Sektorkopplung.pdf](http://energiesysteme-zukunft.de/fileadmin/user_upload/Publikationen/pdf/ESYS_Stellungnahme_Sektorkopplung.pdf).
- Sterner, M. (2014). Power-to-Gas und Speicher im Kontext Energiewende. Zwischen Mythos und Wahrheit. Regensburg: OTH Regensburg, zuletzt abgerufen am 16.11.2017.
- Sterner, M. (2015). Speichertechnologien und ihre Entwicklungspfade. Ostbayerische Technische Hochschule (OTH) Regensburg. Verfügbar unter [https://www.energieland.hessen.de/bfeh/frankfurt/Portf\\_Dr\\_Michael\\_Sterner\\_Speichertechnologien\\_und\\_Entwicklungspfade.pdf](https://www.energieland.hessen.de/bfeh/frankfurt/Portf_Dr_Michael_Sterner_Speichertechnologien_und_Entwicklungspfade.pdf), zuletzt abgerufen am 02.10.2017.
- Stiftung 2° (Hrsg.) (2016). Transformation ambitioniert, verlässlich und planbar gestalten. Unternehmenserklärung zur Diskussion um einen Kohlekonsens.
- Stocker, A., Lazarus, J., Becker, S., Shaheen, S. (2016): North American College/University Market Carsharing Impacts: Results from Zipcar's College Travel

- Study 2015. Effects on Vehicle Use and Ownership, Travel Behavior, Quality of Life, and Environmental Impacts. Berkeley, CA (TSRC Working Paper).
- Stöcker, M. (2008). Biofuels and Biomass-To-Liquid Fuels in the Biorefinery. Catalytic Conversion of using Porous Materials. *Renewable Resources* 47, S. 9200–9211.
- Strategieplattform Power to Gas (2013). Eckpunktepapier. Der Beitrag von Power to Gas zur Erreichung der energiepolitischen Zielstellungen im Kontext der Energiewende. Berlin: Strategieplattform Power to Gas, zuletzt abgerufen am 16.11.2017.
- Strößenreuther, Heinrich (2014): Wem gehört die Stadt? Der Flächen-Gerechtigkeits-Report. *Mobilität und Flächengerechtigkeit. Eine Vermessung Berliner Straßen*. Hg. v. Agentur für clevere Städte. Online verfügbar unter: [https://www.clevere-staedte.de/files/tao/img/blog-news/dokumente/2014-08-05\\_Flaechen-Gerechtigkeits-Report.pdf](https://www.clevere-staedte.de/files/tao/img/blog-news/dokumente/2014-08-05_Flaechen-Gerechtigkeits-Report.pdf), zuletzt geprüft am 31.05.18.
- Tajalli, Merhad; Hajbabaie, Ali (2017): On the relationships between commuting mode choice and public health. In: *Journal of Transport & Health*, S. 267-277.
- Teske, S.; Sawyer, S. & Schäfer, O. (2015). *Energy Revolution. A sustainable world: Energy outlook 2015*. Amsterdam: Greenpeace; Global Wind Energy Council; SolarPower Europe.
- Thamling, N.; Pehnt, M. & Kirchner, J. (2015). *Energieeffizienzstrategie Gebäude*. Erstellt im Rahmen der Wissenschaftlichen Begleitforschung zur Energieeffizienzstrategie Gebäude. Hintergrundpapier. Berlin, Heidelberg, Darmstadt: Prognos; IWU; Institut für Energie- und Umweltforschung (IFEU).
- The Boston Consulting Group & Prognos (2018). *Klimapfade für Deutschland*. Studie im Auftrag des Bundesverbandes der Deutschen Industrie (BDI). Prognos.
- Thrän, D. (2017). Was ist die Teller-Tank Debatte?, *Ideen 2020*. Verfügbar unter <http://www.ideen2020.de/de/361/>, zuletzt abgerufen am 16.05.2017.
- Timpe, C.; Bauknecht, D.; Flachsbarth, F. & Koch, M. (2018). *Transparenz Stromnetze, Stakeholder-Diskurs und Modellierung zum Netzausbau und Alternativen*, zuletzt abgerufen am 23.07.2018.
- Timpe, C.; Bracker, J.; Hacker, F.; Haller, M. & Kasten, P. (2017). *Handlungsbedarf und -optionen zur Sicherstellung des Klimavorteils der Elektromobilität*. Endbericht zum „Wissenschaftlichen Analyse- und Dialogvorhaben zur Sicherstellung des Klimavorteils der Elektromobilität“ (Vergabenummer 16EM2111) im Auftrag des Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit. Freiburg, Berlin: Öko-Institut.
- Trapp, J. H.; Schneider, S.; Arndt, W.-H.; Libbe, J.; Mottschall, M. & Bergmann, T. (2017). *Ressourcenleichte zukunftsfähige Infrastrukturen (RELIS)*. umweltschonend, robust, demografiefest.
- Umweltbundesamt (UBA) (2010). *Energieziel 2050: 100 % Strom aus erneuerbaren Quellen*.
- Umweltbundesamt (UBA) (2012a). *Globale Landflächen und Biomasse nachhaltig und ressourcenschonend nutzen*.
- Umweltbundesamt (UBA) (2012b). *Glossar zum Ressourcenschutz, Dessau-Roßlau*.
- Umweltbundesamt (UBA) (2014). *Treibhausgasneutrales Deutschland im Jahr 2050* (Umweltbundesamt (UBA), Hrsg.) (Climate Change Nr. 07).
- Umweltbundesamt (UBA) (2015b). *Strommarktdesign der Zukunft* (Climate Change 20/2015), Dessau-Roßlau. Verfügbar unter <https://www.umweltbundesamt.de/>

sites/default/files/medien/378/publikationen/  
climate\_change\_20\_2015\_strommarktdesign\_der\_zukunft\_0.pdf, zuletzt abgerufen am 03.02.2017.

- Umweltbundesamt (2016): Bundesverkehrswegplan besteht eigene Umweltprüfung nicht. Online verfügbar unter: <https://www.umweltbundesamt.de/presse/pressemitteilungen/bundesverkehrswegplan-besteht-eigene>, zuletzt geprüft am 31.05.2018.
- Umweltbundesamt (UBA) (Hrsg.) (2017). Entwicklung der spezifischen Kohlendioxid-Emissionen des deutschen Strommix in den Jahren 1990 – 2016, Dessau.
- Umweltbundesamt (UBA) (Hrsg.) (2018). Erneuerbare Energien in Deutschland. Daten zur Entwicklung im Jahr 2017. Hintergrund, Dessau.
- United Nations Framework Convention on Climate Change (UNFCCC) (2015). Paris Agreement. Bonn: UNFCCC.
- Urhonen, Terhi; Lie, Arve; Aamodt, Geri (2016): Associations between long commutes and subjective health complaints among railway workers in Norway. In: Preventive Medicine Reports 4, S. 490-495.
- VCD Verkehrsclub Deutschland (2015a): Carsharing: Auto nutzen statt besitzen. Online verfügbar unter: <https://www.vcd.org/themen/auto-umwelt/carsharing/>, zuletzt geprüft am 24.05.2018.
- VCD Verkehrsclub Deutschland (2015b): Radverkehr: Gewinnfaktor Fahrrad. Online verfügbar unter: <https://www.vcd.org/themen/auto-umwelt/carsharing/>, zuletzt geprüft am 24.05.2018.
- VCD Verkehrsclub Deutschland (2016): VCD Position: Rückeroberung der Straße. Online verfügbar unter: [https://www.vcd.org/fileadmin/user\\_upload/Redaktion/Publikationsdatenbank/Fussverkehr/2016\\_Position\\_Rueckeroberung\\_der\\_Stasse.pdf](https://www.vcd.org/fileadmin/user_upload/Redaktion/Publikationsdatenbank/Fussverkehr/2016_Position_Rueckeroberung_der_Stasse.pdf), zuletzt geprüft am 31.05.2018.
- VCD Verkehrsclub Deutschland (2017): Kerosinsteuer: Notwendig und machbar. Online verfügbar unter: <https://www.vcd.org/themen/flugverkehr/kerosinsteuer/>, zuletzt geprüft am 24.05.2018.
- VDE (2015). Batteriespeicher in der Nieder- und Mittelspannungsebene. Anwendungen und Wirtschaftlichkeit sowie Auswirkungen auf die elektrischen Netze (VDE & Energietechnische Gesellschaft (ETG), Hrsg.), Frankfurt a. M, zuletzt abgerufen am 23.06.2015.
- Verband der Automobilindustrie VDA (2016): Der Lang-Lkw. Online verfügbar unter: <https://www.vda.de/de/themen/umwelt-und-klima/lang-lkw/der-lang-lkw.html>, zuletzt geprüft am 24.05.2018.
- Verband der Automobilindustrie VDA (2017): Umweltschutz in der Produktion. Online verfügbar unter: <https://www.vda.de/de/themen/umwelt-und-klima/umweltschutz-in-der-produktion/automobilproduktion-und-nachhaltigkeit.html>, zuletzt geprüft am 31.05.18.
- Verband der Automobilindustrie (2018). Wissmann: Deutschland braucht weitsichtigeres Klima- und Industriepolitik. Verfügbar unter <https://www.vda.de/de/presse/Pressemitteilungen/Wissmann--Deutschland-braucht-weitsichtigeres-Klima--und-Industriepolitik.html>, zuletzt abgerufen am 14.03.2018.
- Verband der Deutschen Biokraftstoffindustrie (2016). Biokraftstoffindustrie kritisiert Richtlinienentwurf der EU-Kommission scharf. Verfügbar unter <http://www.biokraftstoffverband.de/index.php/detail/items/biokraftstoffindustrie-kritisiert-richtlinienentwurf-der-eu-kommission-scharf.html>.

- Verband Deutscher Reeder (2015). Flüssiggas LNG als Alternativkraftstoff für Schiffe fördern - Maritime Wirtschaft fordert Bundesregierung zum Handeln auf. Hamburg. Verfügbar unter <http://www.reederverband.de/de/presse/pressemitteilung/artikel/fluessiggas-lng-als-alternativkraftstoff-fuer-schiffe-foerdern.html>.
- Verband Deutscher Verkehrsunternehmen (VDV) (ohne Datum): Personenverkehr 2030: Ein Drittel mehr Bus und Bahn. Online verfügbar unter: <https://www.deutschland-mobil-2030.de/personenverkehr-2030-ein-drittel-mehr-bus-und-bahn.aspx>, zuletzt geprüft am 31.05.2018.
- Verband Kommunaler Unternehmen (VKU). „MEHR STROM“ STATT „NUR STROM“. Wie Sektorenkopplung dazu beitragen kann, die Klimaziele zu erreichen. Berlin. Verfügbar unter <https://www.vku.de/vku-positionen/kommunale-energieversorgung/mehr-strom-statt-nur-strom/>.
- Verband Kommunaler Unternehmen (VKU) (2016). Stellungnahme. zum Referentenentwurf eines Gesetzes zur Einführung von Ausschreibungen für Strom aus erneuerbaren Energien und zu weiteren Änderungen des Rechts der erneuerbaren Energien vom 14.04.2016. Berlin: Verband Kommunaler Unternehmen (VKU), zuletzt abgerufen am 01.03.2017.
- Wehnert, T.; Best, B. & Andreeva, T. (2017). Kohleausstieg. Analyse von aktuellen Diskussionsvorschlägen und Studien ; Kurzstudie. Wuppertal: Wuppertal Institut für Klima, Umwelt, Energie.
- Weis, L. (2015). Erdgas, Fracking, Klimawandel - Gas ist keine Lösung, sondern Teil des Problems | Heinrich-Böll-Stiftung, Heinrich Boell Foundation. Verfügbar unter <https://www.boell.de/de/2015/11/30/erdgas-fracking-klimawandel-gas-ist-keine-loesung-sondern-teil-des-problems>, zuletzt abgerufen am 30.11.2017.
- Wetzel, D. (2014). Anforderungen der IG Metall an eine europäische Regulierung der CO2 Grenzwerte im PKW-Bereich für die Zeit nach 2020 (IG Metall Vorstand, Hrsg.), Frankfurt. Verfügbar unter [https://www.igmetall.de/docs\\_CO2\\_Broschuere\\_70c8c2d55f1489620e96bc3121d9b5e773d1dafb.pdf](https://www.igmetall.de/docs_CO2_Broschuere_70c8c2d55f1489620e96bc3121d9b5e773d1dafb.pdf), zuletzt abgerufen am 19.03.2018.
- Wietschel, M.; Gnann, T.; Kühn, A.; Plötz, P.; Moll, C.; Speth, D.; Buch, J.; Boßmann, T.; Stütz, S.; Schellert, M.; Rüdiger, D.; Balz, W.; Frik, H.; Waßmuth, V.; Pauffer-Mann, D.; Rödl, A.; Schade, W. & Mader, S. (2017). Machbarkeitsstudie zur Ermittlung der Potentiale des Hybrid-Oberleitungs-Lkw. Studie im Rahmen der Wissenschaftlichen Beratung des BMVI zur Mobilitäts- und Kraftstoffstrategie. Karlsruhe: Fraunhofer Institut für System- und Innovationstechnik; Fraunhofer-Institut für Materialfluss und Logistik; PTV Transport Consult; TU Hamburg-Harburg; M-Five.
- Wilken, Sebastian (2017): Nachtzüge 2018: Alle Änderungen zum Fahrplanwechsel. Online verfügbar unter: <http://traintracks.eu/nachtzuege-2018-fahrplanwechsel/>, zuletzt geprüft am: 24.05.2018.
- Wimmer, D. O.; Heinemann, C. & Bauknecht, D. (2014). Die Auswirkung räumlich verteilter Windstromproduktion auf den Flexibilitätsbedarf im deutschen Stromsystem. Energiewirtschaftliche Tagesfragen 64 (12), S. 32–35. Verfügbar unter [http://www.et-energie-online.de/Portals/0/PDF/zukunftsfragen\\_2014\\_12\\_wimmer.pdf](http://www.et-energie-online.de/Portals/0/PDF/zukunftsfragen_2014_12_wimmer.pdf), zuletzt abgerufen am 09.06.2015.
- WWF (2017). Der Strom der Zukunft. Kohleausstieg muss für die Einhaltung deutscher Klimaziele spätestens 2019 beginnen/Neue Studie des WWF berechnet robusten Ausstiegspfad bis 2035. Verfügbar unter <http://www.wwf.de/2017/januar/der-strom-der-zukunft/>.

- WWF & Ecofys (2014). Critical materials for the transition to a 100% sustainable energy future. Berlin: WWF, zuletzt abgerufen am 29.11.2017.
- WWF Deutschland (2017). Maßnahmen zur Erreichung des Klimaschutzziels 2020, zuletzt abgerufen am 14.02.2018.
- Zentrum für Europäische Wirtschaftsforschung (ZEW) (2013). Den deutschen Strommarkt an die Wirklichkeit anpassen. Skizze einer neuen Marktordnung. Mannheim: Zentrum für Europäische Wirtschaftsforschung (ZEW), zuletzt abgerufen am 04.10.2017.
- Zimmer, W.; Blanck, R.; Bergmann, T.; Mottschall, M.; Waldenfels, R. von; Förster, H.; Schumacher, K.; Cyganski, R.; Wolfermann, A.; Winkler, C.; Heinrichs, M.; Dünnebeil, F.; Fehrenbach, H.; Kämper, C.; Biemann, K.; Kräck, J.; Peter, M.; Zandonella, R. & Bertschmann, D. (2016a). Endbericht Renewbility III. Optionen einer Dekarbonisierung des Verkehrssektors. Studie im Auftrag des BMUB 2016. Öko-Institut; Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR); Institut für Energie- und Umweltforschung (IFEU); INFRAS.
- Zimmer, W.; Hacker, F.; Blanck, R.; Hülsmann, F.; Moritz, M.; Waldenfels, R. von; Förster, H. & Schumacher, K. (2016b). RENEWBILITY III – Elektromobilität als Baustein der Energiewende des Klimaschutzes: Entwicklung eines Energie- und Verkehrsanalyseinstrumentes zur Modellierung des Beitrags der Elektromobilität. Studie im Auftrag des BMUB. Berlin: Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR); Institut für Verkehrsforschung; Bank für Sozialwirtschaft; Infrac; tipping-points; Institut für Energie- und Umweltforschung (IFEU).
- Zimmer, W.; Hacker, F.; Kasten, P.; Blanck, R. & Bergmann, T. (In Bearbeitung). Klimaschutz 2030: Maßnahmen zur Erreichung des Sektorziels im Verkehrsbe- reich; Modellierung von Maßnahmen zu einer Minderung der CO<sub>2</sub>-Emissionen im Verkehrssektor um 40 % - 42 % bis 2030 (Agora Verkehrswende & Smart Energy for Europe Platform, Hrsg.). Berlin: Öko-Institut.
- Zukunft Erdgas (2017). Wärmemarkt 2050. So erreicht Deutschland kosteneffizient das Klimaziel., zuletzt abgerufen am 12.04.2018.